Proceedings ICPVT-10
July 7-10, Vienna, Austria

# DEVELOPMENT OF TESTING EQUIPMENT FOR STUDYING STATICALLY INDETERMINATE FRACTURE MECHANICS

Masaaki Matsubara
Dept. of Mechanical System Engineering, Faculty of Engineering, Gunma University
E-Mail Address: matsubar@me.gunma-u.ac.jp

| | |
|---|---|
| Satoru Izawa | Oyama Technical College |
| Norichika Hirao | Hitachi Metals, Ltd. |
| Kohji Busujima | Tokyo Electric Power Services Co., Ltd. |
| Tetsu Koyama | Oki Data Corporation |
| Kohji Machida | Shinano Kenshi Co., Ltd. |
| Daisuke Kawada | Mitsubishi Heavy Industries, Ltd. |
| Kenji Sakamoto | Gunma University |
| Kikuo Nezu | Gunma University |


## ABSTRACT

The authors developed new testing equipment for studying statically indeterminate fracture mechanics. The development purpose is to clarify load history-dependency of plastic collapse. The equipment has two actuators orthogonalized. The horizontal actuator applies the axial force and the perpendicular one does the bending moment. In the experiment for examining the effect of load history on the plastic collapse, both actuators can keep the preceding load to the constant load value, until axial force or bending load reach the theoretical collapse point. The actuators can apply the following load under the displacement control in the experiment. The performance of the equipment was confirmed by demonstration tests using single-edge notched specimens of SUS304 steel. The experimental result clarified the load history-dependency on the plastic collapse in SUS304 single-edge notched member subjected to combined tension and bending.

## 1. 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 brittle fracture, ductile fracture and plastic collapse [1-7]. 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. Though J-R analysis method is effective for ductile fracture evaluation of cracked member, there is much constraint in the use. Two-parameter method replaces the J-R analysis method, and it becomes a general. The two-parameter method predicts the ductile fracture by interpolating linear elastic fracture mechanics and plastic collapse concept. In single-edge cracked member subjected to combined tension and bending, the load history dependence of tension and bending does not exist in the brittle fracture in which the handling in linear elastic fracture mechanics is possible. However, the load history-dependency exists for the plastic collapse load of this member. The plastic collapse load of single-edge cracked member subjected to combined tension and bending until now was obtained by limit load analysis. Therefore, the load history-dependency is not considered at the collapsing load. It is important to clarify the load history-dependency on plastic collapse load of single-edge cracked member subjected to combined tension and bending from the viewpoint for the accuracy improvement of structural integrity evaluation. Authors developed statically indeterminate fracture mechanics experimental equipment which enables the examination of the load history-dependency on the plastic collapse of the member. This report describes the advantage of the equipment. In addition, the experimental research result on load history-dependency on the plastic collapse for SUS304 single-edge notched member specimen carried out as performance evaluation test is reported.

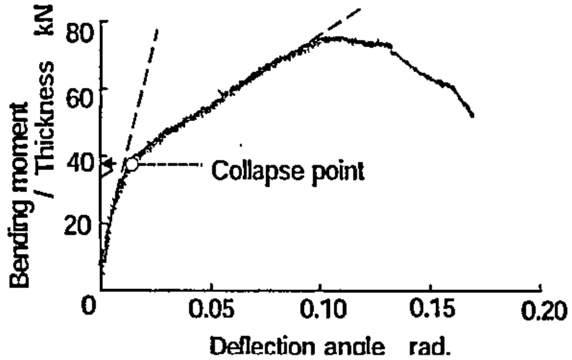


Fig.6. Bending moment- rotation curve.

comparatively clearly. That is to say, the collapse point is an intersection point in the tangent pulled for plastic part and straight line pulled for elastic part of both charts, as shown in Fig.5 and 6. The load in this point is a collapse load (? in the figures). Axial force + bending simultaneous load experiment brings about both charts of *P/B- u* chart and *M/B- ?* chart. That is to say, it is possible to observe two collapse points experimentally. The observation of two collapse points in the simultaneous load experiment became possible for the first time with the statically indeterminate fracture mechanics experimental equipment. In Fig.7, the ordinate is plastic constraint factor for bending $P_b'/1.5s_y$, and the abscissa is plastic constraint factor for tension $P_m'/s_y$. In Fig.7, solid line shows the collapse limit curve. Fig.7 shows example of experiment for examining load history-dependency of axial force and bending on the plastic collapse for one point of equation (1).

$$\frac{P_b'}{1.5\sigma_y} = 1 - \left(\frac{P_m'}{\sigma_y}\right)^2 \qquad (1)$$

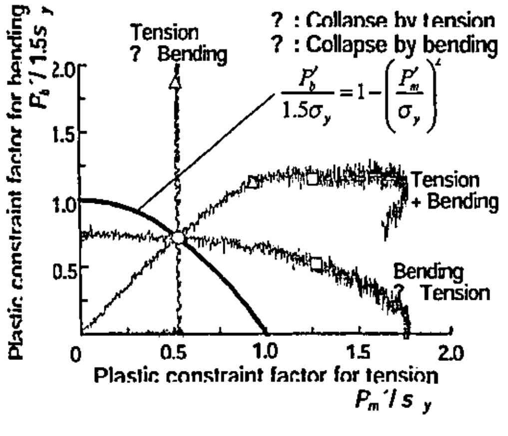


Fig.7. Confirmation of the testing equipment performance.

The developed equipment can realize the test pattern ( See Fig.3 ), test 1~ 3 of axial force + bending simultaneous load, axial force load ? bending load and bending load ? axial force load. In the simultaneous load test, collapse point ? for the axial force and collapse point ? for the bending respectively appear as shown in Fig.7. To begin with, the collapse point for the bending can be confirmed in this case. In the collapse point, the relation between $P_b'/1.5s_y$ and $P_m'/s_y$ bends. The collapse point for the axial force appears in the interval where $P_b'/1.5s_y$ is almost fixed for $Pm'/s_y$.

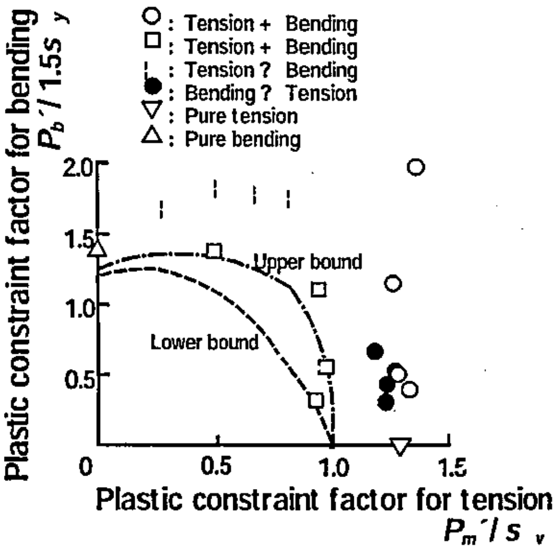


Fig.8. Experimental result.

Fig.8 shows the experimental result. The ordinate and abscissa are equal to those in Fig.7. The lower bound improved by Okamura et al. [4] is shown in broken line. The upper bound ( the extension of Green's solution [8] by Shiratori et al. [5] and the circular slip line solution by Rice [9] )is shown in the dashed line. In case of the simultaneous load, the collapse point ? by the bending precedes collapse point ? by the axial force. Shiratori et al. [5] showed that rotation factor *r* rapidly changed near *a/W*=0.5 and *r* becomes a value of about 0.5 over it in the deep crack by the rigid-plastic analysis for single-edge cracked specimen subjected to combined tension and bending (See Fig.9). Tensile deformation becomes a subject in the shallow crack, since *r* is bigger than 1.0 and radius of rotation *R* increases from *W'* as shown in Fig.9. In the deep crack, *r* is smaller than 1.0. *R* becomes a value of about 1/2 of *W'*. Therefore, center of rotation and ligament center agree almost. As the result, the bend deformation becomes a subject. *a/W* of the specimen in this experiment is 0.6, and it becomes a case of the deep crack. By the reason described above, the plastic collapse by the bending seemed to precede in case of the simultaneous load.

## 2. NOMENCLATURE

*F*: Axial force.
*B*: Plate thickness.
*W*: Plate width.
*W* ': Ligament dimension.
*e*: The distance between plate width center and ligament center.
*A*: Notch dimension.
*M*: Bending moment.
*M'*: Bending moment (=*M*+*Fe*) for the ligament center.
$P_m$: Membrane stress intensity ($=F/BW$)
$P_b$: Bending stress intensity ($=6M/BW^2$)
$P_b'$: Bending stress intensity for the ligament center ($=6M'/BW'^2$).
$P_m'$: Ligament center membrane stress intensity ($=F/BW'$).
$s_y$ : Yield strength.

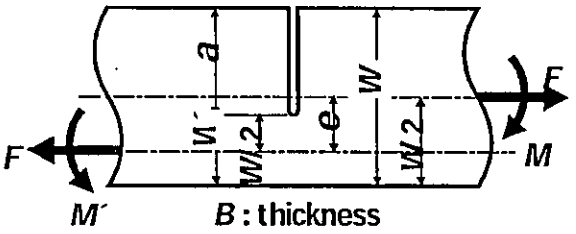



Fig.1. Description of symbols.

## 3. INDETERMINATE FRACTURE MECHANICS EXPERIMENTAL EQUIPMENT

Fig.2 shows the summary of statically indeterminate fracture mechanics experimental equipment. This equipment can independently control axial force and bending. It is possible that the equipment takes axial force and bending at simultaneous load or optional order. Therefore, it can make plastic collapse test considering the load history-dependency which changed axial force and bending load sequence. Hydraulic cylinder for tensile load is the about 400kN largest capacities. The cylinder of the bending load is the about 100kN largest capacities. Load cell for the tensile load detection is the about 500kN capacities. The cell for the bending load detection is the about 100kN capacities. Perpendicularly installed hydraulic cylinder loads bending load on specimen. On the other hand, the part of the pin which takes the tensile load becomes the structure of which the perpendicular motion is restricted. As the result, the bending load becomes four-point bending type which receives bending load in which near notch division of specimen is uniform. The displacement gage of the cylinder tip detects displacement signal for feedback control. The displacement gage measures perpendicular displacement of two points in specimen upper part. The angle of deflection displacement is the value which divided the difference in perpendicular displacement of the two points by the distance between displacement gages. The angle of deflection displacement is used in order to carry out plastic

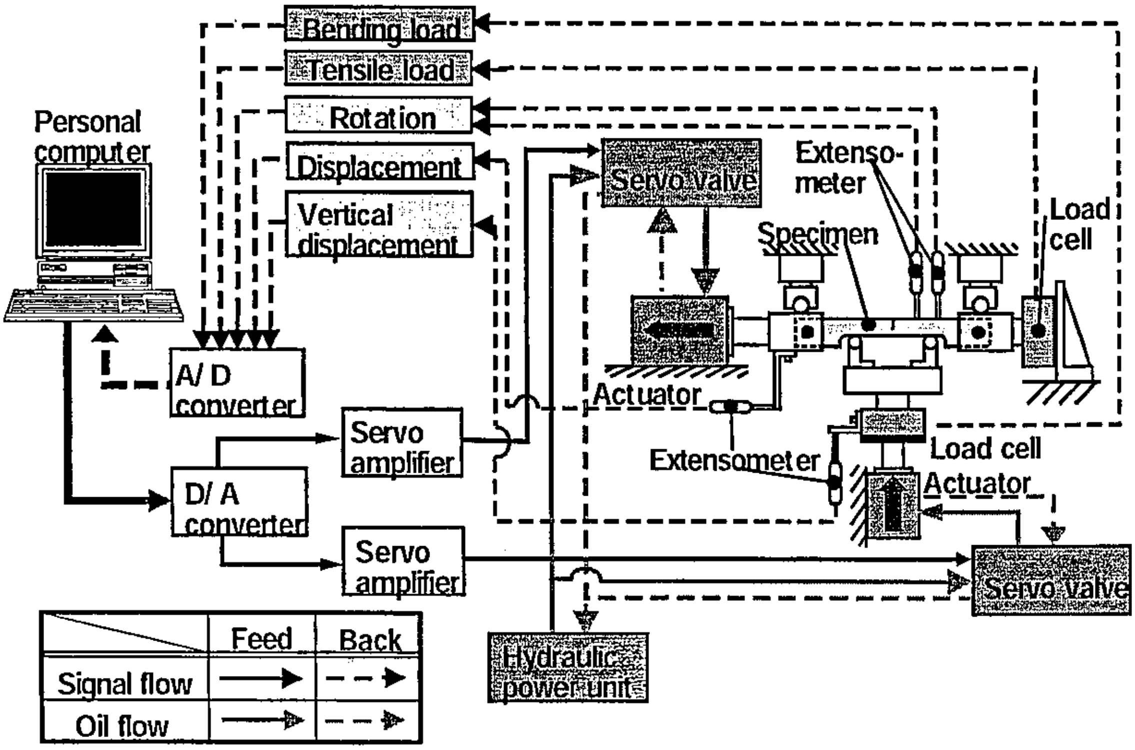



Fig.2. Conceptual scheme of the testing equipment developed.

collapse decision for the bending load. The control program written on personal computer in C-language carries out load control of testing equipment. The D/A board transmits the control order signal to the servo amplifier. The servo amplifier drives the servo valve based on the signal transmitted. The servo valve controls flow rate of hydraulic oil. The hydraulic oil controlled in servo valve enters hydraulic cylinder. The hydraulic oil makes hydraulic cylinder operate. The personal computer processes signals from displacement gage and load cell fed back, when hydraulic cylinder operated. Based on dealt with signal, the personal computer controls deformation and load applied on specimen. Fig.3 shows the test pattern in examining the effect of load history on the plastic collapse. A point ( point A~ D in Fig.3 ) on the collapse limit curve as an object is a desired value. In the experiment, there are 3 patterns of axial force + bending simultaneous load ( test pattern A1~ D1 ), axial force load ? bend load ( test pattern A2~ D2 ) and bending load ? axial force load ( test pattern A3~ D3 ). Test patterns for examining the load history-dependency are as follows. The applied load which precedes to experiment target point ? keeps constant value. Succeeding load becomes with the displacement control load for judging the plastic collapse. The axial load line passes through the ligament center as described later.

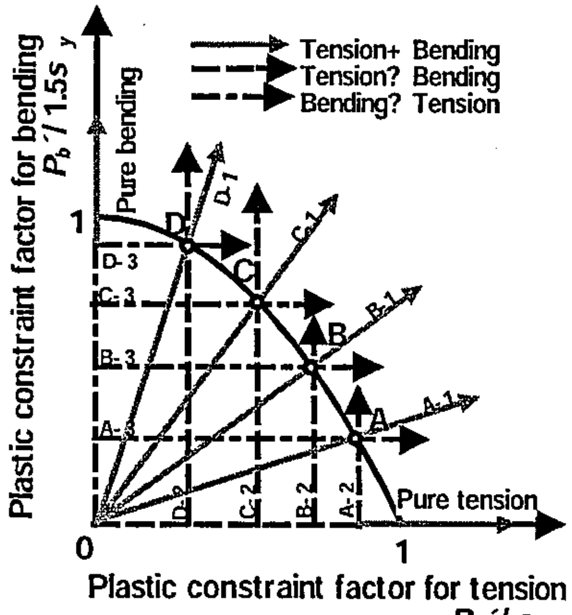



Fig.3. Test pattern.

## 4. EXPERIMENTAL RESULT AND CONSIDERATION

The purpose of the experiment is the performance validation of developed statically indeterminate fracture mechanics experimental equipment. The material tested is SUS304 steel plate of the 65mm width and the 16mm thickness. Table 1 shows the chemical composition. Fig. 4 shows the specimen configuration dimension figure.

**Table 1 Chemical composition of the material tested (wt.%).**

| C | Si | Mn | P | S | Ni | Cr |
|---|---|---|---|---|---|---|
| 0.06 | 0.45 | 0.99 | 0.34 | 0.11 | 8.03 | 18.10 |

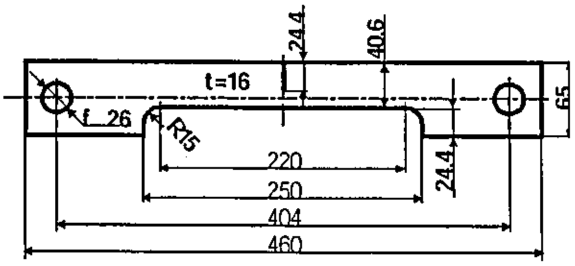



**Fig.4 Geometries figure of the specimen.**

The specimen has the notch of 0.32 mm slit width cut by wire-cut. Therefore, the radius in the notch tip is 0.16mm. Axial load line and ligament center of the specimen agree in order to enable the test near the point A of Fig.3 in which the proportion of axial force increases. Fig. 5 and 6 show the example of axial force per unit thickness *P/B* - axial displacement *u* chart and bending moment per unit thickness *M/B*- angle of deflection *?* chart observed in the experiment.

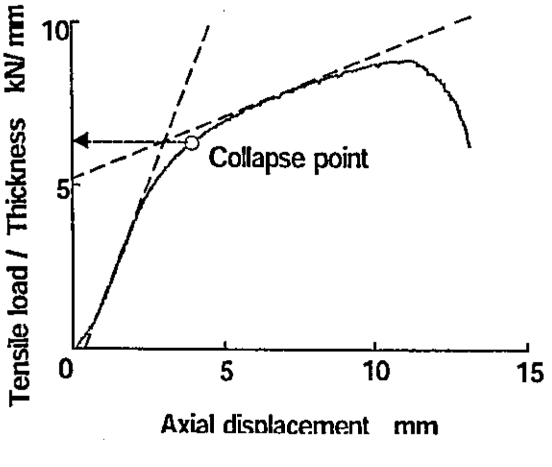
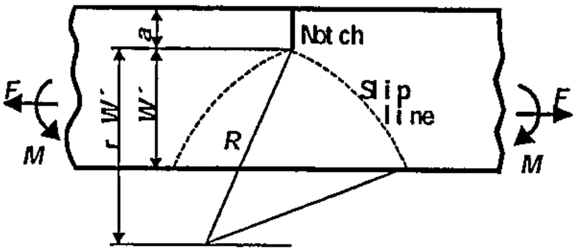
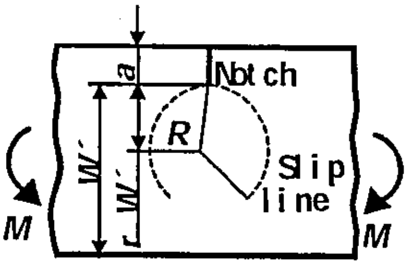



**Fig.5. Axial load- displacement curve observed.**

Adoptive collapse point method for evaluation is the tangent intersection from the reason of determining the collapse point on the chart




(a) Tension dominant.




(b) Bending dominant.

**Fig.9. Definition of *r* and *R*.**

$P_b'/1.5s_y$ and $P_m'/s_y$ of collapse point in case of axial force load-? bend load ¦ and bending load ? axial force load ? are bigger than those of upper and lower bound. The plastic constraint factor at collapse increases in comparison with that of upper bound or lower bound on collapse point ¦ in case of axial force load ? bend load and collapse point ? in case of the bending load ? axial force load. It is a primary purpose of the statically indeterminate fracture mechanics experimental equipment development to obtain the result shown in ¦ and ? in Fig.8. The load history-dependency on the plastic collapse of the single-edge notched member subjected to combined tension and bending is shown in the form of the increase in the plastic constraint factor for upper bound or lower bound got by the rigid-plastic analysis. The collapse point in case of pure bending ? and the simultaneous load ? is distributed near the upper bound point. In the meantime, the collapse point ? in case of pure tension becomes larger than analytic solution $P_m'/s_y = 1.0$. The necking deformation is generated in ligament back in notch cross section of the specimen in this case, as shown in Fig.10. It is considered that the increase of $P_m'/s_y$ in the collapse point originates from this necking deformation. The collapse point by the axial force in case of the simultaneous load or the bending load ? axial force load shows the value of $P_m'/s_y = 1.2\sim 1.3$ almost equal to that in pure tension regardless of the value of $P_b'/1.5s_y$. This result seems to also originate from necking deformation in the ligament back. $P_m'/s_y$ in the collapse point by the axial force does not seem to receive the bending effect, even if it is the combination of any axial force and bending.

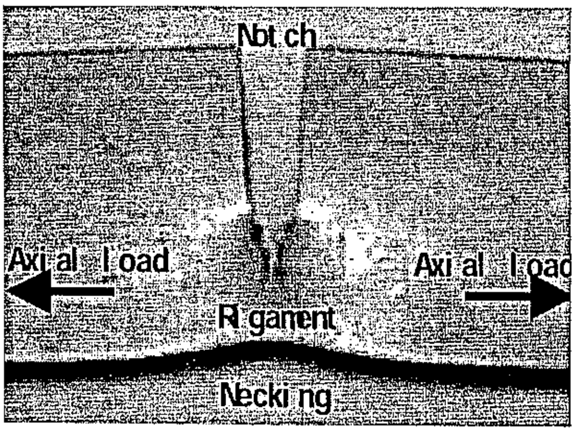



**Fig.10. A photograph near the notch division (Pure tension).**

## 5. Conclusion.

This report described the advantage of statically indeterminate fracture mechanics experimental equipment originally developed. The equipment can confirm experimentally the load history-dependency on the plastic collapse for the SUS304 single-edge notched member specimen. The purpose of the experiment also serves as a performance validation test. Conclusions are as follows.

(1) For the purpose of the structural integrity evaluation of the single-edge cracked member subjected to combined tension and bending, authors developed statically indeterminate fracture mechanics experimental equipment. This equipment can individually control axial force load and bending load each.

(2) Performance was validated on the experiment which examined the load history-dependency on plastic collapse for SUS304 single-edge notched member specimen. Preceding applied load keeps constant value to goal collapse point given analytically. The load succeeded for the collapse point decision becomes the displacement control load.

(3) It is possible to discuss the effect of load history on plastic collapse of the single-edge notched member subjected to combined tension and bending from the viewpoint of the change of the plastic constraint factor.

## Reference

[1] Okamura,H., Takano,T., and Watanabe,K., 1972, Application of Fracture Mechanics to the Analysis of Statically Indeterminate Structure, Mechanical Behavior of Materials,? , pp.245-255.

[2] Okamura,H., Watanabe,K., and Takano,T., 1973, Application of the Compliance Concept in Fracture Mechanics, ASTM STP, **536**, pp.423-438.
[3] Okamura,H., Watanabe,K., and Takano,T., 1975, Deformation and Strength of Cracked Member Under Bending Moment and Axial Force, Engineering Fracture Mechanics, 7, pp.531-539.
[4] Okamura,H., Kageyama,K., and Takahata,Y., 1983, Lower Bound Solution and Their Application of the Collapse Load of a Cracked Member Under axial Force and Bending Moment, ASTM STP, **803**, pp.? -262-? -277.
[5] Shiratori,M., and Miyoshi,T., 1980, (in Japanese), Transactions of the Japan Society of Mechanical Engineers, Series A, **46**, pp.837-843.
[6] Matsubara,M., 2000, A Parametric Study on J-integral under Pressurized Thermal Shock by Using Statically Indeterminate Fracture Mechanics,Nuclear Engineering and Design, **196**, pp.153-159.
[7] Matsubara,M., Stumpfrock,L., and Roos,E., 2001, Application of Statically Indeterminate Fracture Mechanics, SIFM, to a Circumferentially Cracked Cylinder Problem, Nuclear Engineering and Design,Nuclear Engineering and Design, **207**, pp.351-357.
[8] Green,A.P., 1953, The Plastic Yielding of Notched Bar Due to Bending, Quart. Journ. Mech. and Applied Math., **?** , pp.223-239.
[9] Rice,J.R., 1972, The Line Spring Model for Surface Flaws, Proceedings of Surface Flaw Symposium, American Society of Mechanical Engineers Winter Annual Meeting, pp.171-185.

715

# 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

小山高専　伊澤　悟　群馬大学　○松原雅昭
群馬大学　根津紀久雄　群馬大学　坂本賢治
沖データ　太田敦士

## 1 緒　　言

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、膜応力および曲げ応力と各種変位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にその機械的性質を示す。欠陥を想定した平均半径における切欠き角度を60°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。

Table1 Mechanical properties.

| material | Yield stress $\sigma_{0.2}$ [MPa] | Tensile strength $\sigma_B$ [MPa] | Elongation $\phi$ [%] |
|---|---|---|---|
| SUS304 | 298 | 602 | 61.5 |

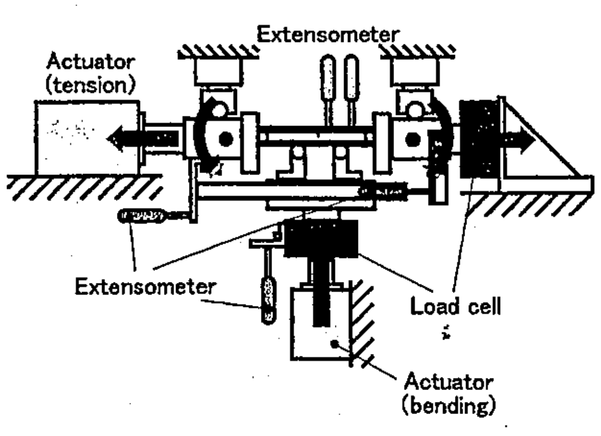



Fig.1 Testing equipment.

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.1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。試験時には，軸方向と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。

この際、配管表面に光弾性被膜を接着し、生じた光弾性縞模様からリガメント部の塑性域の形成と塑性崩壊状態を一部試験条件で調査した.

**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.2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$P_m$および曲げ応力強さ$P_b$は

$$P_m=\frac{\pi-\alpha-2\gamma}{\pi-\alpha}\sigma_y \tag{1}$$

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

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、

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

となる。

この一般式に、試験片形状の形状係数を代入して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を設定し、軸力曲げ同時試験、軸力→曲げ試験および曲げ→軸力試験の各試験を通じて負荷履歴の影響の検討を行った。

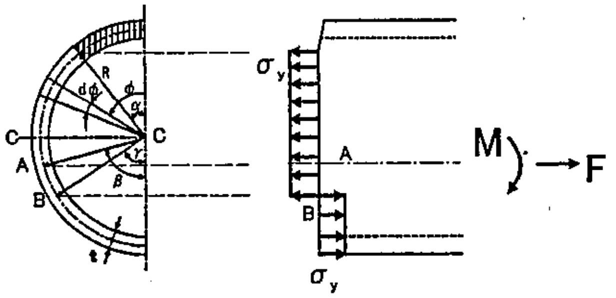



Fig.2 Stress state of the ligamennt subjected to combined tension and bending.

## 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方法

軸力曲げ同時負荷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、それぞれの崩壊点を比較した。併せて、塑性崩壊時は塑性変形が顕著となり切欠開口変位に大きな影響を及ぼすため、膜応力および曲げ応力強さ－切欠開口変位線図からも崩壊点の判定を行い比較検討した。

なお、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. 3 に、本研究で定義した塑性崩壊状態における応力の一般式に、本試験片の試験片形状の形状係数を代入して求めた崩壊限度曲線と、軸力曲げ同時負荷試験結果より得られた各線図より二倍変位法によって求めた崩壊点を示す。

曲げ応力－たわみ角線図（●）および曲げ応力－切欠開口変位を使用した線図による崩壊点（□）は、塑性崩壊限度曲線に沿うような形で分布しており、本研究で導出した塑性崩壊限度線図の妥当性を示した。一方、膜応力評価による崩壊点（○▲）は、配管に曲げ変形が生じることにより膜応力の定義が複雑化するため、塑性崩壊限度曲線から離れた位置に分布してしまう結果となった。

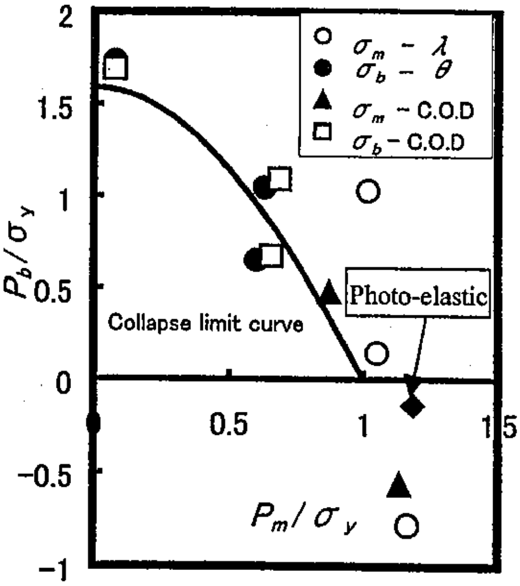



Fig.3 The distribution of the plastic collapse point.
(Tension + bending)

また、軸力曲げ同時試験における軸力が支配的な負荷パターンでの、リガメント部の塑性域の形状を光弾性被膜法により観察した結果を Fig. 4 に示す。切欠先端より降伏が始まり円弧状にすべり線を描き配管下端部へと光弾性縞（塑性域）が貫通している。このリガメント部の塑性域の形状は軸力と曲げの負荷条件により異なり崩壊に直接影響を及ぼす.

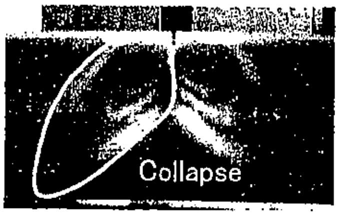



Fig. 4 Photograph of the ligament.
(Photo-elastic coating)

ここで、軸力と曲げの負荷履歴が塑性崩壊荷重に及ぼす影響を調査するため、切欠開口変位線図より求めた崩壊点を塑性崩壊限度線図上に示した結果を Fig. 5 に示す。この結果は、軸力と曲げの負荷履歴に関係なく各試験条件における崩壊点が塑性崩壊限度曲線付近に分布しており、塑性崩壊挙動に負荷履歴の影響があまりないことを表している。

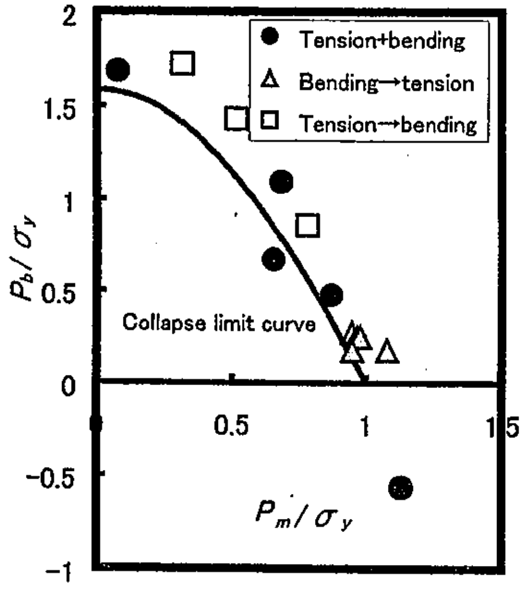



Fig.5 The distribution of the plastic collapse point.
(Stress intensity - C.O.D chart)

## 4 結論

不静定破壊力学試験装置を用い、軸力と曲げを受ける SUS304 切欠付配管の塑性崩壊挙動について得られた結言は以下の通りである。

(1)同時負荷試験における曲げ応力－たわみ角線図および曲げ応力－切欠開口変位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した。

(2) 軸力と曲げの負荷履歴が塑性崩壊荷重に及ぼす影響はほとんどない。

### 参考文献

1) 岡村・高畑・影山, 機論, 49-455A, 1076-1081 (1979) .
2) 白鳥正樹・三好俊郎・古矢正明, 機論 (A 編), 47-423, 1139-1146 (1977).

# 318 ステンレス鋼切欠付配管の塑性崩壊実験に関する研究

Reseach on Plastic Collapse Test in Through-Wall Notched Stainless Steel Pipes.


正 松原雅昭 (群大工) ○ 学 針塚宏樹 (群大院) 正 大田敦士 (沖データ)
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)
Masaaki MATSUBARA , Hiroki HARIZUKA, Kikuo NEZU and Kenji SAKAMOTO,
Gunma University, Tenjin-cho 1-5-1, Kiryu, Gunma
Satoru IZAWA, Oyama National College of Technology, Nakakuki 771, Oyama, Tochigi
Atushi OTA, Oki Deta,hutaba-cho 3-1,Takasaki, Gunma



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


## 1. 緒論

一般に高靭性低強度材料として知られるオーステナイト系ステンレス鋼は,様々な用途に用いられ軽水炉プラントの冷却用配管にも使用されている.プラント内の配管は初めから内在する欠陥,または供用中に発生するき裂が原因で漏洩事故等が発生する可能性が多々ある.こういった事故を未然に防ぐため,ステンレス構造物に欠陥やき裂が見つかった場合は,それがまだ使用可能か否かなどの耐久性と安全性(構造健全性)を評価しなくてはならない.そこで構造健全性評価をする上で最も基本的なモードである軸力と曲げの負荷を受ける片側切欠部材を考えた.

一般に最終的に塑性崩壊すると言われるオーステナイト系ステンレス鋼配管材の塑性崩壊荷重に及ぼす負荷履歴依存性と負荷条件の違いからくる破壊形態の変化を明らかにすることが本研究の目的である.

## 2. 実験方法

### 2.1 実験装置

本学が独自に開発している2軸独立負荷制御可能な油圧制御試験機(不静定破壊力学実験装置)をFig.1に示す.本試験装置は軸力と曲げの独立負荷が可能であり,負荷履歴を考慮した試験が可能となっている.供試材料である配管材にはFig.2に示すようにオーステナイト系ステンレス鋼SUS304を使用した.SUS304鋼の化学成分をTable.1に示す.配管部材の寸法は外径32mm,内径16mmおよび管厚1.5mmである.配管中央には実際のき裂を模擬した周方向貫通切欠がワイヤーカット放電加工にて施されている.その切欠幅0.32mmおよび切欠先端の曲率半径0.16mmとなっている.

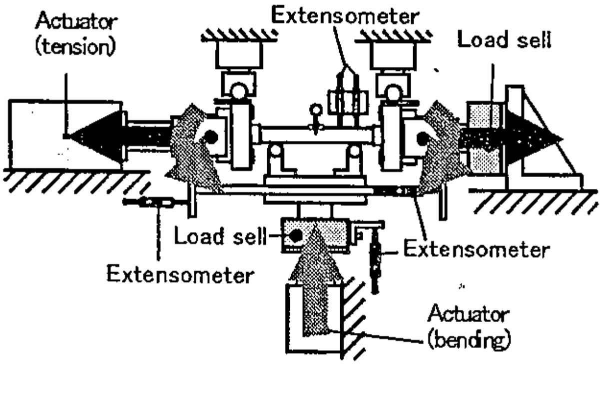



Fig.1 Testing equipment

Table.1 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 |

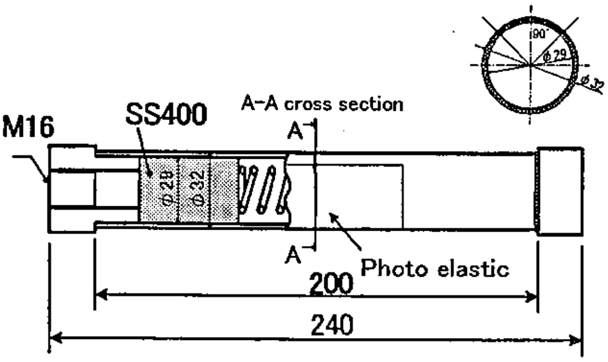



Fig.2 Geometries figure of the specimen

### 2.2 試験方法

負荷履歴として以下の3つの試験パターンを行なった.

1, 軸力と曲げを同時に負荷させる同時負荷試験
2, 一定軸力を加えた状態で曲げを負荷していく軸力→曲げ試験
3, 一定曲げを加えた状態で軸力を負荷していく曲げ→軸力試験

Fig.3に本研究で崩壊点の評価に使用する塑性崩壊限度理論曲線を示し,負荷履歴の3つのパターンについても一緒に示す.本研究はすべて塑性崩壊限度理論曲線を用いて塑性崩壊点判定を行なう.今回は光弾性皮膜法,そして実験から得られた各値より,軸方向荷重-軸方向変位線図,曲げモーメント-たわみ角線図を作成し,崩壊点判定に二倍変位法を用いて得られた崩壊点を塑性崩壊限度曲線にプロットし,その結果を理論曲線と比較検討し,負荷履歴の崩壊点に及ぼす影響を調べる.

Fig.3に各試験パターンを示す．実線は軸力曲げ同時負荷試験．破線は曲げ→軸力試験．一点破線は軸力→曲げ試験である．

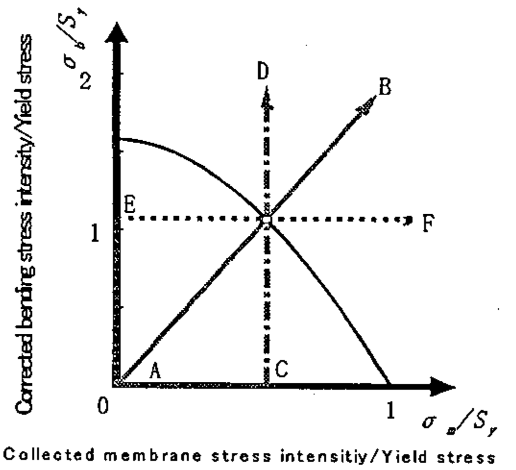
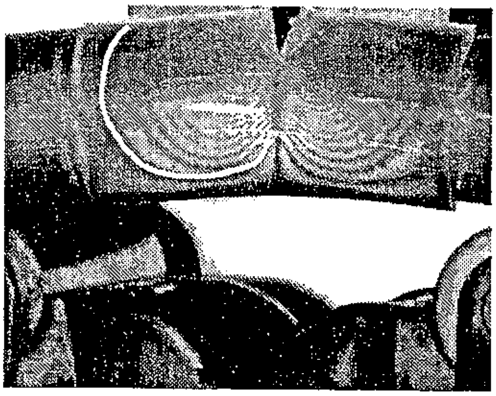



Fig.3 Collapse limit curve

3. 試験結果・考察

3.1 光弾性皮膜法による評価

光弾性縞の写真をFig.4に示す．この写真は，軸力→曲げ試験で得られた光弾性縞である．光弾性縞は第一次の縞の発生を供試材料の降伏点に一致させた．それは皮膜材料の主ひずみ差感度の調整を，皮膜の厚さの変更することにより可能とした．



Tension → Bending

Fig.4 Photo elastic picture

本研究ではき裂が進展する前に，第一次の縞がリガメント部を貫通した時を塑性崩壊点と定義している．Fig.4のTension→Bendingの光弾性皮膜より，第一次の縞がリガメント部を貫通する前に，き裂が成長するのを確認した．その他の試験パターンではき裂が進展する前に第一次の縞がリガメント部を貫通した．以上のことから，負荷履歴の違いにより破壊形態に違いがでてくることが明らかとなった．崩壊点は軸力→曲げ同時負試験，曲げ→軸力試験の時に得ることができた．

3.2 崩壊限度曲線による評価

軸曲げ同時負荷試験には，曲げ応力-たわみ角線図および膜応力-軸方向変位線図の両方から崩壊点の判定を行なった．軸力→曲げ試験は、曲げ応力-たわみ角線図。曲げ→軸力試験は、膜応力-軸方向変位線図からそれぞれ崩壊点の判定を行い，合わせて比較した．Fig.5に曲げ応力-たわみ角線図を示し，Fig.6に膜応力-軸方向変位線図を示す．

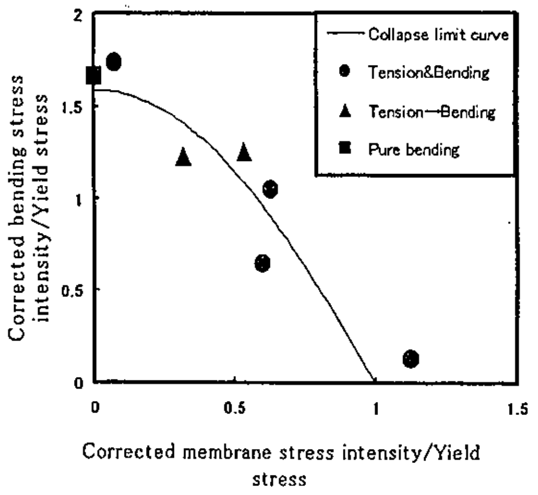
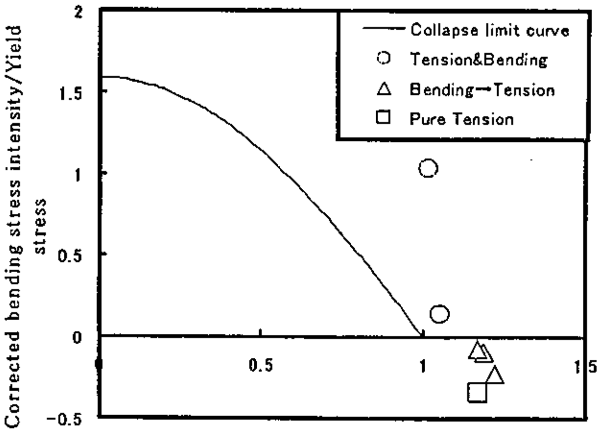



Fig.5 The Distribution of the plasticcollapse point (Bending stress-rotation chart)

Fig.5より同時負荷試験の崩壊点(●)は塑性崩壊限度曲線に沿って分布していることがわかる．また軸力→曲げ試験の崩壊点(▲)も同様に沿っていることがわかる．




Corrected membrane stress intensity/Yield stress

Fig.6 Distribution of the plastic collapse point (Menbrane stress-rotation)

同様にしてFig.6では軸力曲げ同時負荷試験の崩壊点(○)と曲げ→軸力試験の崩壊点（△）を比較すると，両試験とも$\sigma_y/S_y$の分布がほぼ近い値を示すことから負荷履歴の影響はないと考えられる．

4. 結論

(1)同時負荷試験における曲げ応力-たわみ角線図から判定した塑性崩壊点は塑性崩壊限度曲線近傍に分布する．

(2)光弾性皮膜法より，軸力および曲げの負荷履歴の違いにより破壊形態に違いが出る．

(3)軸力と曲げの負荷履歴の違いによって，塑性崩壊限度曲線上の崩壊点の分布に影響が出る．

# 光弾性皮膜法による切欠付ステンレス配管の塑性崩壊判定

伊澤 悟*, 松原 雅昭**, 根津紀久雄**, 坂本 賢治**

*小山工業高等専門学校（〒323-0806 栃木県小山市大字中久喜 771）

**群馬大学工学部（〒370-8515 群馬県桐生市天神町 1-5-1）

# Plastic collapse evaluation of notched stainless steel piping Subjected to combined tension and bending by photo-elastic coating.

Satoru IZAWA, Masaaki MATSUBARA, Kikuo NEZU and Kenji SAKAMOTO

This study is concerned with evaluating effects of a load history on the plastic collapse load of stainless steel sheets with a notch. Experimental equipment has been specially developed to cope with the indeterminate problems in fracture mechanics. By observing a ligament portion of a test piece using the photo-elastic coating method, the collapse point was determined by comparing it to a penetration point in the plastic region in the ligament. As a result, it has been found that a different load history affects the formation of the plastic. Then, there were effects of a load history on the plastic collapse load.

**Key words:** Photo-elastic coating, Plastic Collapse, Notched Member, Tension and bending

## 1. 緒 論

エネルギープラント機器配管などに用いられるオーステナイト系ステンレス鋼は靭性が極めて高く荷重負荷の増大とともに最終的に塑性崩壊に至る. 塑性崩壊点は, 塑性域がリガメント部全体に広がり, 以降は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される. このためリガメント部全体にすべり線が発生した全断面降伏状態を可視化することが出来れば, 塑性崩壊点の解明は可能であると考えられる.

光弾性皮膜法は, 実際の構造物や部材に直接皮膜を接着し, 材料特性や負荷状況を忠実に取り入れた形で応力解析が可能である. また, 測定できるひずみ範囲が大きいため弾性、塑性解析にも有用である. 本研究では, 光弾性皮膜法を用いて切欠付配管の応力状態を可視化し, 塑性崩壊判定への適用について検討を行う.

## 2. 実 験 方 法

### 2. 1 実験装置および供試材料

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.

実験に用いた供試材料は, Fig.1 に示す外径 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. 欠陥を想定した平均半径における切欠き角度を 60° 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. この切欠付配管に光弾性皮膜を接着し, 偏光を入射し, 反射光を解析し応力解析を行った.

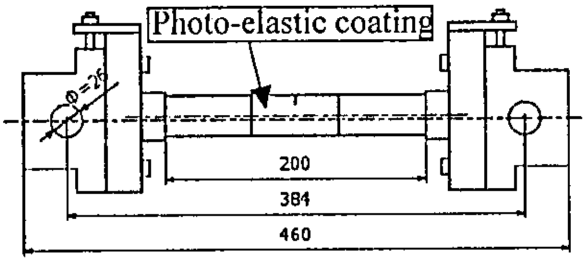



Fig.1 Geometries figure of the specimen.

### 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.2 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 $P_m$ および曲げ応力強さ $P_b$ は

$$P_m = \frac{\pi - \alpha - 2\gamma}{\pi - \alpha}\sigma_y \tag{1}$$

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

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,

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

となる.

この一般式に，試験片形状の形状係数を代入して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を設定し，軸力曲げ同時試験，軸力→曲げ試験および曲げ→軸力試験の各試験を通じて負荷履歴の影響の検討を行った．

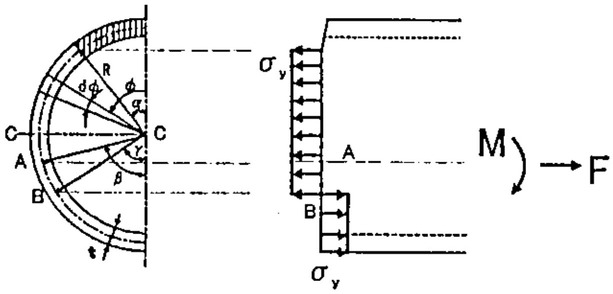



Fig.2Stress state of the ligamennt subjected to combined tension and bending.

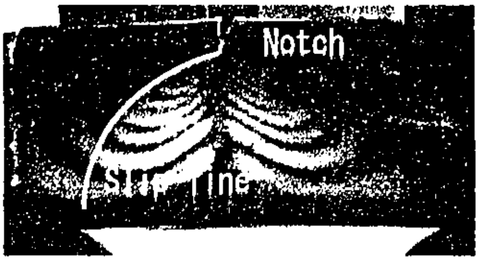
## 3. 実 験 結 果 お よ び 考 察

### 3. 2 光弾性被膜法による評価

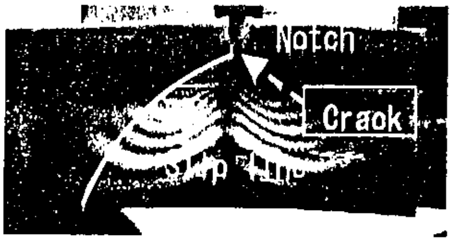
Fig.3 に塑性崩壊点における光弾性縞の観察結果を示す．本研究では，塑性域の外輪郭を示す第一次の縞（降伏応力に一致）の貫通点を塑性崩壊点としている．

軸力と曲げの荷重負荷形態の違いにより，リガメント部を進展する塑性域の形状は異なる．最大せん断荷重で定義されるすべり線の形成による塑性域の形成の違いは，リガメント部の崩壊に直接影響を及ぼし，これが崩壊点の違いとなる．ここで，軸力→曲げ試験における一部の負荷パターンでは，塑性崩壊に至る以前にき裂の進展が見られ，軸力→曲げの負荷履歴によって塑性崩壊から弾塑性破壊へと，その破壊形態に影響を及ぼすことが明らかになった．

(a) Tension ＋ bending




(b) Bending → Tension




(c) Tension → bending

Fig.3 Photograph of the ligament.

### 3. 2 崩壊限度線図による評価

Fig. 4 に、本研究で定義した塑性崩壊状態における応力の一般式に、本試験片の試験片形状の形状係数を代入して求めた崩壊限度曲線と、軸力曲げ同時負荷試験結果より得られた各線図より二倍変位法によって求めた崩壊点を示す。

光弾性皮膜法により算出した崩壊点（◆）は、各線図より二倍変位法によって求めた崩壊点と同様に本研究で導出した塑性崩壊限度線図付近に分布した。

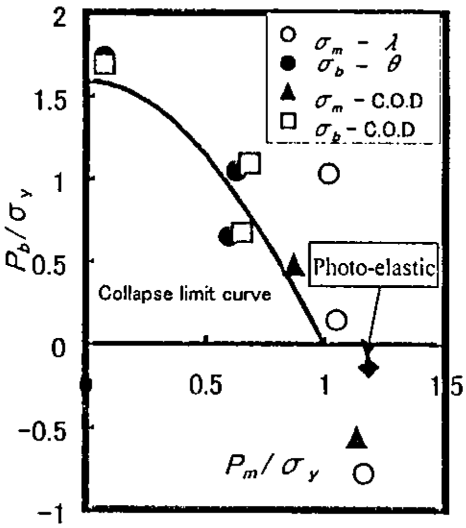



Fig.4 Stress The distribution of the plastic collapse point.

## 4. 結論

(1)光弾性皮膜法による軸力－曲げ複合負荷下の応力状態の可視化の結果，リガメントを貫通する塑性域の形状は，すべり線の形成が原因となって軸力と曲げの負荷条件により異なる．

(2) 軸力と曲げの負荷履歴による塑性域の形成の違いが原因となって塑性崩壊の形態に影響を及ぼす。

## 参 考 文 献

1) 松原雅昭・伊澤 悟・平尾典盟・毒島康二・小山 哲・町田康治・川田大介・坂本賢治・根津紀久雄，機論(A 編)，(2001)，1218-1222
2) 岡村・高畑・影山,機論，49-455A (1979)，1076-1081.
3) 白鳥正樹・三好俊郎・古矢正明，機論 (A 編)，47-423 (1977)，1139-114.

# 316 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

Research on Stress Analysis Method in a Single-Edge Notched Stainless Steel Subjected to Combined Tension and Bending.

○ 学 宮田 覚史（小山高専） 正 伊澤 悟（小山高専）
正 松原 雅昭（群大工）
Miyata Satoshi ・Oyama National college of technology
Izawa Satoru・Oyama National college of technology
Matsubara Masaaki・Gunma University

1．目的

原子力発電所などのエネルギープラント機器の配管に用いられるステンレス鋼は、地震や内圧などによる複合荷重を受ける。これらの構造物は欠陥を有した状態でも破壊強度に十分な裕度が必要となる。このステンレス鋼は荷重負荷に伴い顕著な塑性変形を起こし塑性崩壊に至る。軸力—曲げ複合荷重下における塑性崩壊荷重への負荷履歴の影響は、設計時における安全裕度を大きく取ることで回避している。

本研究では、切欠を有するステンレス鋼ＳＵＳ３１６について光弾性皮膜法を用いてリガメント部の応力状態を可視化し塑性域の貫通点により崩壊点を求めた。得られた塑性崩壊点を有限要素法による応力解析結果と比較検討し、軸力および曲げの負荷履歴が材料の塑性崩壊点に与える影響を解明することを目的とする。

2．試験方法

本研究では二軸独立負荷制御可能な不静定破壊力学実験装置を使用する。この試験装置では水平荷重（軸力）、垂直荷重（曲げ）をそれぞれ独立、同時負荷、または任意の順序で負荷が出来る。これにより、軸力のみ、曲げのみ、任意の割合の軸力、曲げの負荷履歴が与えられる。供試材料としてオーステナイト系ステンレス鋼ＳＵＳ３１６を用いる。試験片は片側に切欠を導入した板材で、試験時は軸力、曲げ、軸方向変位、曲げ方向変位、たわみ角、開口変位の測定を行う。

2．1 負荷パターン

次の３つの負荷パターンについて試験を行う。

1)軸力と曲げを同時に負荷する「同時負荷試験」
2)軸力を負荷し、その軸力を一定に維持して曲げを負荷する「軸力→曲げ試験」
3)曲げを負荷し、その曲げを一定に維持して軸力を負荷する「曲げ→軸力試験」

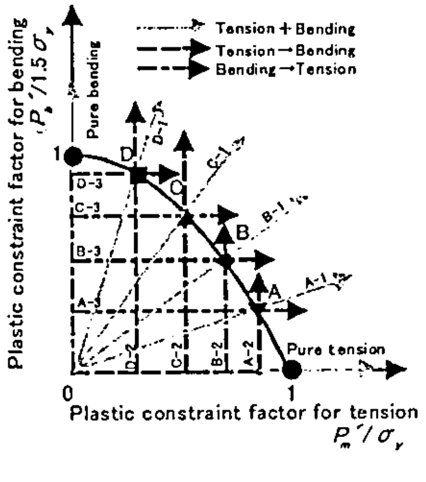



Fig.1 Load pattern

Fig.1 に示すように同時負荷試験には A-1 から D-1 までの４パターン、軸力→曲げ試験には A-2 から D-2 までの４パターン、曲げ→軸力試験には A-3 から D-3 まで４パターン、その他に軸力のみ、曲げのみの計１４パターンの負荷履歴を与える。

2．2 光弾性皮膜法

光弾性皮膜法とは、構造物の表面に光弾性材料を接着し，生じた縞模様から構造物表面の応力・ひずみを解析するものである。光弾性材料を接着した構造物に偏光を入射し、その反射光から光弾性皮膜に現れる縞を解析する。解析で得られる縞は、試験片表面の主ひずみ差に比例することから、応力・ひずみを求めることができる。そのことから、塑性域で発生する縞を求め、その縞がリガメント部を貫通した時、塑性崩壊点の定義である塑性域の貫通を知ることが可能である。

今回使用した光弾性皮膜は、常温硬化型エポキシ樹脂にチオコールを混ぜ自作した。エピコート：チオコール：ポリアミン=10:10:1 の割合で配合したものを使用する。一縞目が降伏点である、この光弾性皮膜を試験片のリガメント部に接着し試験する。その時、縞の状態（応力状態）を観察し画像に残し、塑性域の貫通点（塑性崩壊点）を調査した。

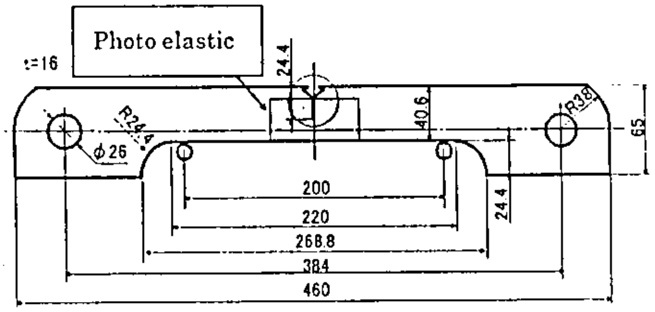



Fig. 2 Geometries figure of the specimen

2．3 光弾性縞と材料の応力の関係

試験片に荷重をかけたとき最大せん断応力の進展に沿ってすべり線が発生する。負荷パターン別に膜応力と曲げ応力に対する円弧半径の大きさを発生した光弾性縞から測定した。

ここで縞貫通時の荷重より膜応力、曲げ応力を求め、●印は軸力－曲げ同時試験、▲印は軸力→曲げ試験、■印は曲げ→軸力試験の結果を Fig.4 に示す。黒印は $\sigma m/\sigma y$、中抜印は $\sigma b/1.5\sigma y$ に対応する。グラフの横軸 $r/a$ はすべり線の円弧半径をリガメント部長さで、縦軸は膜応力および曲げ応力を降伏応力で割り無次元化したものである。膜応力が大きくなると円弧半径は大きくなり、逆に曲げ応力が大きくなると円弧半径は小さくなる。両者の分布は $r/a$ が 1.0 から 1.5 付近で交差する結果となった。

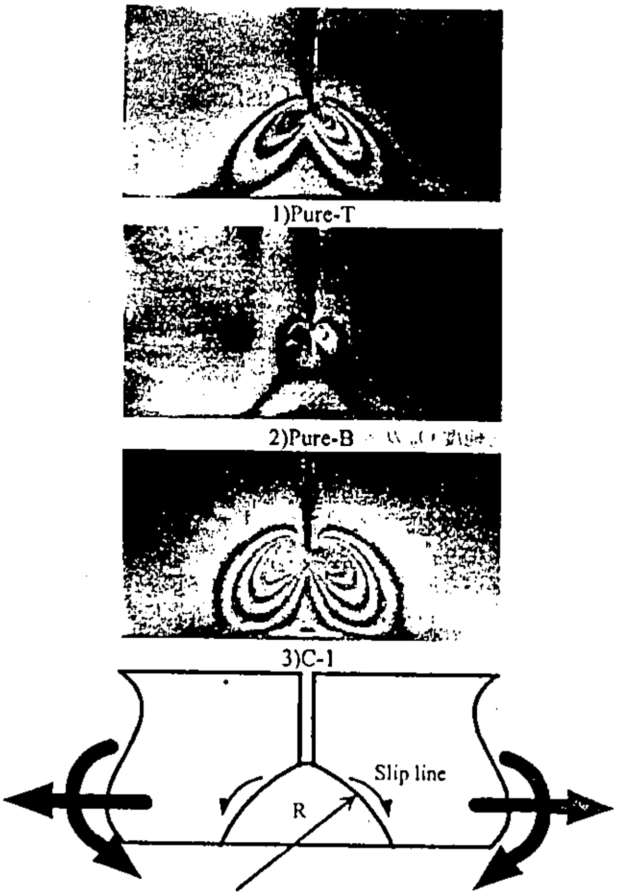



Fig. 3 Photograph of the ligament and shape of slip line arc

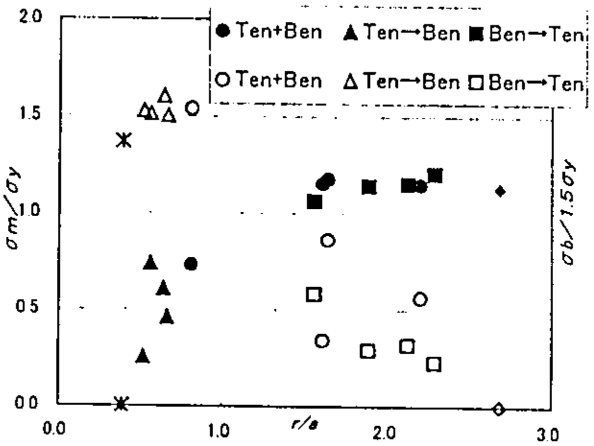



Fig.4 Relationship between stress intensity and radius of slip line arc

### 3．有限要素法による応力解析

#### 3．1　解析条件

本解析では有限要素法解析プログラムＡＮＳＹＳを使用した。試験片は左右対称なので右半分のみをモデル化し、荷重をかけるための拘束条件を決定した。リガメント部(切欠の下部)は対称拘束とし、ピン穴部は中心から剛体ビームを張り荷重を与え中心部からは回転拘束とする。モデルのメッシュは切欠部を密にしその他の場所は粗くした。要素数は４４２、節点数は１７００となった。応力解析に必要な材料特性は、ＳＵＳ３１６板材の引張り試験によって得られた応力－ひずみ線図より、弾性率、接線係数、降伏応力を求め使用した。そして、光弾性皮膜法による塑性域貫通点での軸方向および曲げ方向荷重を負荷条件として代入し、有限要素法によって得られた応力分布について考察した。

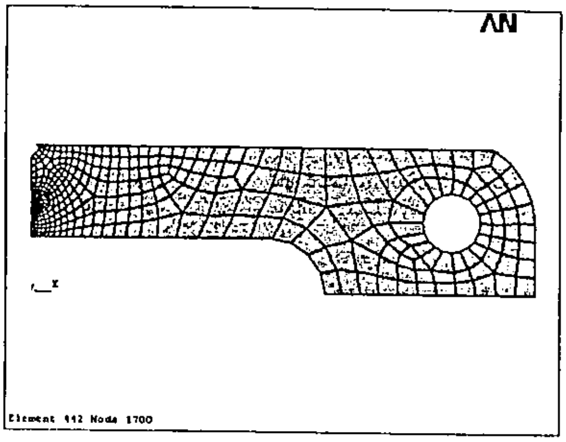



Fig.5 Finite element mesh pattern

#### 3．2　解析結果

解析結果から、Pure-Tなど引張りが支配的なパターンでは塑性域が貫通し塑性崩壊に至っている。しかし、Pure-Bなど曲げが支配的なパターンでは塑性崩壊を過ぎている。これは、今回の解析では試験片の大変形に対応しておらず、メッシュ部に潰れが起きないためと思われる。実際の試験では曲げによる局所変形が起き、塑性域がリガメント部を貫通するためには、高い荷重が必要となるからである。

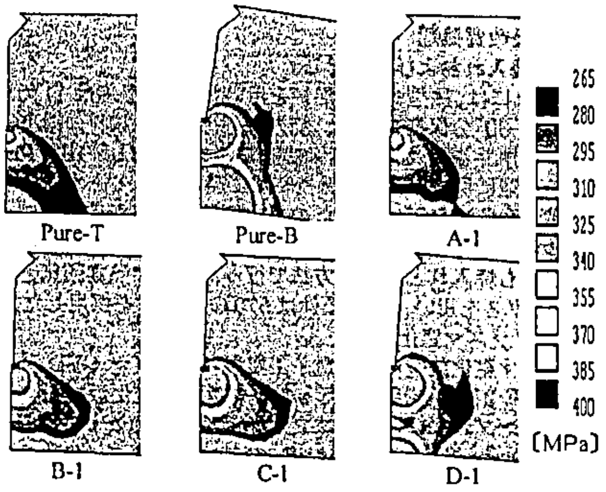



Fig.6 Analysis result

### 4．結論

１）軸力－曲げ複合荷重下でリガメント部を進展するすべり線は、荷重負荷条件により形状が異なると共に、膜応力に対する曲げ応力の割合が増加すると半径が小さくなり円弧中心が切欠先端に近づく。

２）光弾性皮膜法と有限要素法の崩壊判定結果は、軸力が支配的な荷重条件でよい一致を示したが、曲げ支配では有限要素法のメッシュが大変形に対応せずに両者に誤差を生じた。

### 参考文献

１）船渡　恵太郎・伊澤　悟・松原　雅昭、日本機械学会関東学生会第４１回　学生員卒業研究発表講演前刷集、（２００２）、５－６

*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.

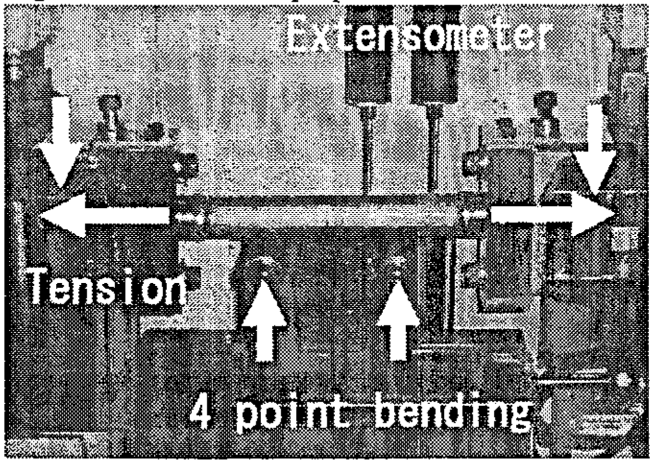



Fig. 1. A photograph of testing equipment.

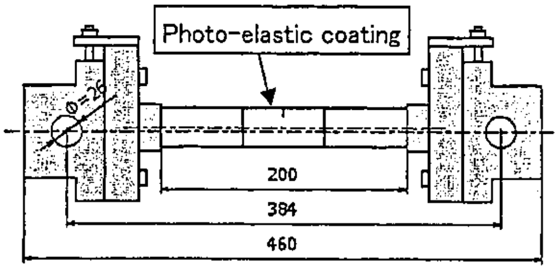



Fig. 2. Geometries figure of the specimen.

Table 1. Mechanical properties tested materials.

| Yield stress $\sigma_y$ [MPa] | Tensile strength $\sigma_B$ [MPa] | Elongation $\phi$ [%] |
|---|---|---|
| 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 $\alpha$ =half notch angle, $R =$ mean radius, $t$ =pipe thickness and $\gamma$ =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.

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

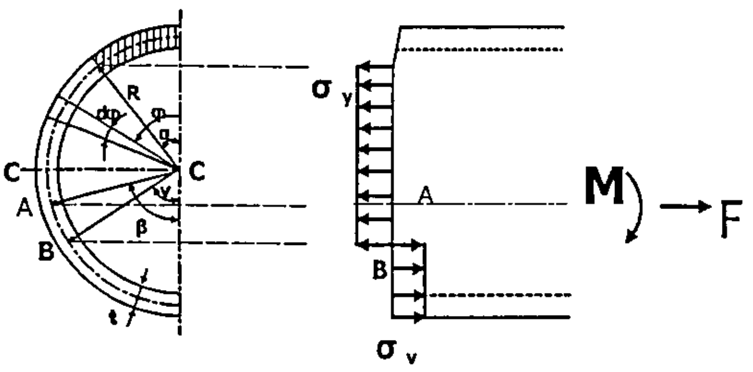



Fig. 3. Geometrical details of notch in a pipe and resulting stress distribution under plastic collapse.

**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.

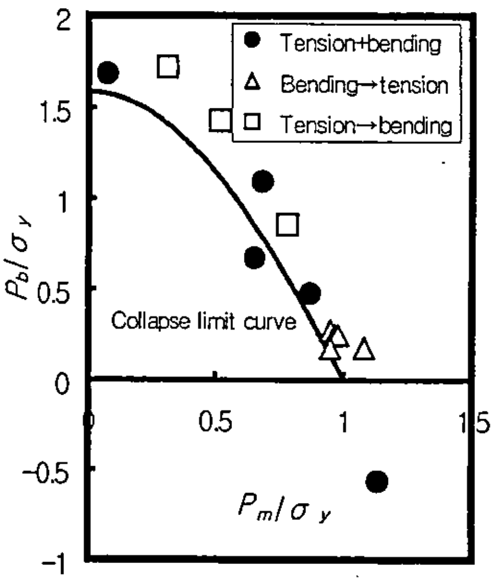



Fig. 4. The distribution of the plastic collapse point.
(Stress intensity- notch opening displacement chart)

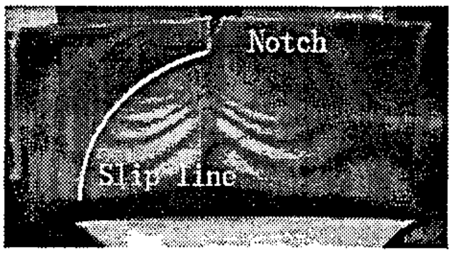



Fig. 5. Photograph of the simultaneous test.

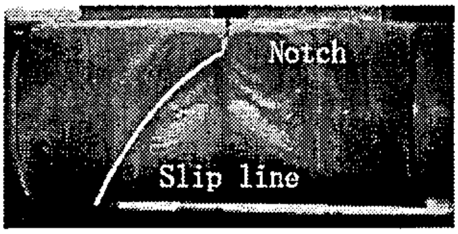



Fig. 6. Photograph of the tension-after-bending test.

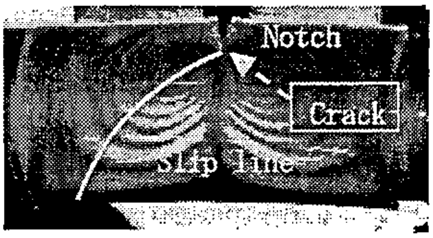



Fig.7. Photograph of the bending-after-tension test.

## 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