628 軸力と曲げを受ける SUS316 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

Load History Effect on Plastic Collapse in a single-Edge Cracked SUS316

Subjected to combined Tension and Bending.

○正 伊澤 悟 (小山高専) 正 川田大介 (三菱重工)

正 松原雅昭 (群大工) 正 根津紀久雄 (群大工)

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

Daisuke KAWADA, Mitsubishi Heavy Industries, Ltd, Ebaoki-machi 5-1, Naka-ku, Hiroshima

Masaaki MATSUBARA and Kikuo NEZU, Gunma University, Tenjin-cho 1-5-1, Kiryu, Gunma

A steel member would have cracks during manufacturing process and long-term service. The cracked member could failure when an earthquake happened. This paper describes a new experimental equipment enables us to evaluate a load history effect on plastics collapse loads in a single edge cracked member subjected combined tension and bending. The experimental result shows the load history effect on the plastics collapse loads in the members.

Keywords : Load History, Single-Edge Cracked Member, Tension and Bending, Plastic Collapse

1. 緒論

軽水炉プラントなどのエネルギー装置においてステンレス鋼は必要不可欠であり、その構造健全性の評価は欠陥の存在を想定した場合でも破壊強度に十分な裕度を有することを前提として行われる。このステンレス鋼は荷重負荷に伴い顕著な塑性変形と共に塑性崩壊を起こす。ここで、実機の運転条件を考慮すると、定常運転時の内圧に起因する引張りと地震等に起因する過大な曲げとの複合荷重が重要かつ基本的な負荷形態となる。この軸力-曲げ複合荷重下における塑性崩壊荷重は負荷履歴により異なることが知られているが、ハードウェアの問題等から実現されておらず、これについては安全裕度を大きく取ることで回避してきている。

そこで、本研究では二軸独立負荷制御可能な不静定破壊力学試験装置を用いて、切欠を有するステンレス鋼SUS316について、軸力および曲げの負荷履歴が材料の崩壊点に与える影響を明らかにすることを目的とする。

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、片側に切欠を持つオーステナイト系ステンレス鋼SUS316であり、その試験片形状および寸法をFig. 1に示す。片側切欠の加工はワイヤカット放電で行ない、軸力の中心とリガメント中心を一致させた。

軸力と曲げの負荷履歴の異なる荷重形態を及ぼすため、独自に開発した二軸独立負荷制御可能な不静定破壊力学試験装置

Fig. 1 Test specimen

Fig. 2 Fracture mechanics test equipment

概要をFig. 2に示す。これにより、軸力と曲げの複合荷重について負荷経路の異なる以下の3種類の試験を行なった。

- 同時試験………軸力と曲げを同時に負荷する。
 - 軸力→曲げ試験……軸力を負荷した後に曲げをかける。
 - 曲げ→軸力試験……曲げを負荷した後に軸力をかける。
- ここでは、軸方向変位、垂直方向変位、軸方向荷重、垂直方向荷重、たわみ角、切欠開口変位の計測を行なう。

2.2 崩壊点の判定

崩壊点の判定は、実験結果から得られた膜応力強さ-軸方向変位線図および曲げ応力強さ-たわみ角線図について、接線法により行なった。

2.3 光弾性皮膜法

塑性崩壊は、リガメント部を塑性域が貫通し、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考えられるため、光弾性皮膜法により塑性域の可視化を同時に行なった。光弾性皮膜は、常温硬化型エポキシ樹脂により自作し、その光弾性ひずみ差感度は、 $\beta = N / 2t(\epsilon_1 - \epsilon_2) = 28(1/\text{mm})$ である。ここで、 $\epsilon_1 - \epsilon_2 = (1 + \nu)\epsilon_1$ である。この光弾性皮膜をリガメント部に接着し、観察を行ない崩壊点との関係を明らかにした。

3. 実験結果および考察

3.1 崩壊限度曲線による評価

崩壊点の判定を、以下の2種類の線図を作成し接線法により行なった。

I. 膜応力強さ-軸方向変位線図

II. 曲げ応力強さ-たわみ角線図

軸力→曲げ試験についてはI, 曲げ→軸力試験についてはII, 同時試験についてはIとIIの両方からの判定が可能であり, それぞれ求めた崩壊点の分布をFig. 3に示す。

Fig. 3 Distribution of collapse point according to the load history.

複合荷重状態にある試験片の崩壊点の判定に、単軸応力による判定基準を適用したこの結果は、IIの曲げ応力より求めた同時試験の結果を除き、正味断面応力が理論崩壊荷重を超えても塑性崩壊していないことを表している。これは、ステンレスなどの加工硬化能の高い材料は、正味断面応力が降伏応力を超えても塑性崩壊することはないと考えられているためである。これに対して、IIで評価した同時試験については理論崩壊曲線の上界と下界とに囲まれた領域に分布している。ここで、同じ曲げ応力強さ-たわみ角線図より求めた同時負荷試験の崩壊点(図中●印)に対し、軸力→曲げ試験の崩壊点(図中■印)は $P_b / 1.5 \sigma_y$ の値の大きい位置に分布している。軸力の負荷履歴により崩壊点は $P_b / 1.5 \sigma_y$ の値の大きい方に推移し、軸力の負荷履歴が大きいほどその傾向は大きくなる。同様に、膜応力強さ-軸方向変位線図曲げ→軸力試験の崩壊点(図中△印)は、同時負荷試験の崩壊点(図中○印)とほぼ同じ P_m / σ_y の値の位置に分布していることから、曲げの負荷履歴による崩壊点への影響は少ないといえる。

3.2 光弾性皮膜法による評価

リガメント表面に接着した光弾性皮膜の観察を行い、負荷方法による崩壊形態の違いを調べた。この結果から、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大きく異なり、このすべり線の形成による塑性域形成の違いは、リガメント部の崩壊に直接影響を及ぼす。

1 縞目(塑性域)貫通時の、軸力のみ、曲げのみ、軸力曲げ同時負荷試験におけるリガメントの観察写真をFig. 4に示す。

Fig. 4 Observation in the ligament division.

3.3 崩壊点評価についての検討

線図により求めた崩壊点と、光弾性皮膜から求めた塑性域の貫通点との比較をTable 1に示す。表面の塑性域の貫通点は、単軸応力について求めた線図による崩壊判定結果に比べて、軸力のみ、曲げのみの結果とともに値が小さく、これは特に曲げのみ試験でその差が大きかった。曲げのみの負荷は、塑性域の貫通に支配的であるといえる。軸力→曲げ複合荷重試験について、同時試験の崩壊点の判定は膜応力および曲げ応力の両方からの判定が可能であり、その両者の崩壊点は単軸応力基準をそのまま適用しているため一致しない。ここで、同時試験については崩壊点が両線図からの結果の中間にあり、塑性域の貫通がそれを顕著に表していると考えられる。なお、軸力→曲げおよび曲げ→軸力両試験については、崩壊点と塑性域の貫通点はほぼ一致している。また、負荷履歴の影響に関して、特に軸力→曲げ試験の結果が曲げのみ試験の結果に比べ $P_b / 1.5 \sigma_y$ の値が極端に大きい位置に分布していることから、軸力の負荷履歴は塑性崩壊を遅延する方向に働くと考えられる。これに対し、崩壊点への曲げの負荷履歴は軸力に比較して小さい。

Table 1 The comparison of the collapse point.

Load		Collapse point		Penetration point
		membrane stress	bending stress	
Pure tension	P_m / σ_y	1.50		1.26
	$P_b / 1.5 \sigma_y$	0		0
Pure bending	P_m / σ_y		0	0
	$P_b / 1.5 \sigma_y$		1.57	0.75
Tension + bending	P_m / σ_y	1.46	0.79	1.26
	$P_b / 1.5 \sigma_y$	1.06	0.92	1.02
Tension → bending	P_m / σ_y	0.53		0.53
	$P_b / 1.5 \sigma_y$		1.82	2.12
Bending → tension	P_m / σ_y	1.46		1.40
	$P_b / 1.5 \sigma_y$		0.47	0.40

4. 結言

- (1) 負荷履歴はリガメントの塑性域形成の違いを導き、これが崩壊点の違いとなって表れる。
- (2) 軸力→曲げ試験における軸力の負荷履歴は、塑性崩壊を遅延させる方向に働く。