周方向表面欠陥を有する 6 inch 口径 ステンレス鋼製配管の不安定破壊試験*

植田 脩三^{*1}, 栗原 良一^{*1}, 加藤 潔^{*2}
鬼沢 邦雄^{*1}, 関谷 秀郎^{*3}, 宮園 昭八郎^{*1}

An Unstable Fracture Test of Circumferentially Cracked Type 304 Stainless Steel Pipes

Shuzo UEDA, Ryoichi KURIHARA, Kiyoshi KATO,
Kunio ONIZAWA, Hideo SEKIYA, and Shohachiro MIYAZONO

The authors are performing an unstable fracture test of circumferentially cracked pipes in order to investigate the possibility of mitigating the conservative assumption of guillotine break in light-water reactor pressure boundary piping. The tests were performed at 285°C and at 6.86 MPa using type 304 stainless steel pipes of 165.2 mm in diameter and 11.0 mm in thickness. It is concluded that the predicted fracture load by the net-section-stress approach is conservative in a limited range of crack dimensions.

Key Words: Fracture, Unstable Fracture, Pipe, Bending, Circumferential Crack, Leak Before Break

1. 緒 言

原研では、配管信頼性実証試験の一環として不安定破壊試験を実施している。この試験研究の目的は、軽水形原子力発電プラントの配管の破壊抵抗を明らかにし、不安定破壊の条件を明らかにすることである。このような配管の不安定破壊に関する研究では、軸方向欠陥を有する配管については多くの研究がなされ不安定破壊条件が明らかにされている。しかし軽水形原子力発電プラントにおいて現在想定されている配管の瞬時破断の考え方を緩和するため軽水炉配管が周方向欠陥を有する場合の不安定破壊条件を明らかにすることが必要になっている。

周方向欠陥を有する配管の不安定破壊に関しては、簡易 J 積分を用いる方法が最初に Tada, Paris⁽¹⁾ によって取り上げられ Zahoor, Wilkowski および Kanninen らによって拡張、精密化された⁽²⁾⁻⁽⁴⁾。英国では Smith らが同様な手法を開発している⁽⁵⁾。国内では矢川・鹿島ら⁽⁶⁾が引張荷重下でのステンレス鋼板材およ

び配管の不安定破壊条件に関する研究を行っている。また、町田ら⁽⁷⁾は曲げ荷重下での配管不安定破壊条件に関する理論的検討を行っている。原研では常温における貫通および未貫通欠陥付き配管の曲げ荷重下の不安定破壊試験⁽⁸⁾および高温高圧水を負荷した状態での未貫通欠陥付き配管の不安定破壊試験を行っている。本報では高温高圧水を負荷した状態での未貫通欠陥付き配管の不安定破壊試験を行って不安定破壊条件を検討した結果について述べる。

2. 試験装置および試験方法

図 1 に試験装置の概念図を示す。不安定試験装置は、電動ジャッキ、皿ばね、四点曲げジグおよび門形フレームから構成されている。試験体の支持点スパンは、2 000 mm、負荷点スパンは 600 mm とした。電動ジャッキと四点曲げジグとの間には皿ばねを入れた。皿ばねは配管系がエネルギーを蓄える効果を模擬したもので、そのコンプライアンスの値は 2.04 m/MN とした。なお、一部の試験では、皿ばねを介さずに直接曲げ負荷をかけた。試験体は、フレキシブルチューブおよび補助配管を介して配管破断試験装置に結合され BWR 運転条件の温度および圧力の高温高圧水 (6.86 MPa, 285°C) が循環されている。一様曲げ荷重は

* 昭和 62 年 8 月 21 日 第 65 期全国大会講演会において講演、原稿受付 昭和 62 年 2 月 12 日。

^{*1} 正員、日本原子力研究所 (〒319-11 茨城県那珂郡東海村)。

^{*2} 日本原子力研究所。

^{*3} コンピュータサービス(株) (〒160 東京都新宿区西新宿 2-6-1)。

表 1 試験条件と試験結果のまとめ

RUN NUMBER	CRACK ANGLE (°)	CRACK DEPTH (mm)	PRESSURE (MPa)	COMPLIANCE (mm/kN)	MAXIMUM LOAD (kN)	FRACTURE MODE
5907	0	0	6.86	0	245	COLLAPSE
5908	90	10.0	"	2.02	63	STABLE
5909	90	8.0	"	"	147	STABLE
5714	180	10.0	"	"	49	STABLE
5810	180	8.0	"	"	112	UNSTABLE
5910	180	5.5	"	"	171	UNSTABLE
6001	240	8.0	"	"	99	UNSTABLE
6002	240	5.5	"	"	168	UNSTABLE
6003	360	5.5	"	"	158	UNSTABLE
6101	180	2.75	"	0	237*	STABLE
6102	360	5.5	"	0	170	STABLE

* After the maximum load 240 kN

表 2 試験配管の化学成分と機械的性質

Chemical composition (%)						
C	Si	Mn	P	S	Ni	Cr
0.06	0.46	1.47	0.028	0.003	9.2	18.7
Mechanical properties						
Temperature (°C)	Yield Stress σ_y (MPa)		Tensile Strength σ_t (MPa)		Elongation (%)	
RT	226		611		61.5	
285	193		427		35.0

図 1 試験体系

図 2 試験体形状

BWR 条件に達した後に荷重した。荷重は変位制御方式で行い、電動ジャッキの変位速度は、0.3 mm/s とした。試験体の全長は 3 000 mm、外径は、165.2 mmφ である。板厚は試験体中央部 400 mm の部分を 11.0 mm としその他の部分は剛性を高めるため 18.2 mm とした。試験体の中心内表面の周方向に欠陥を放電加工法により加工した。試験体には、流体圧力および流体温度を測定するための計測座を設けた。試験体での形状を図 2 に示す。この試験体形状は内圧が荷重できるようにシールした点を除いて常温用試験体と同じである⁽⁸⁾。

荷重、変位（ジャッキ、荷重点）試験体熱膨張、き裂発生、圧力および温度を計測した。

試験は 10 回行い、表 1 に欠陥角度、欠陥深さ、コンプライアンスなどの試験条件と破損荷重などの試験結果をまとめて示す。表 2 に試験体材料の化学成分と機械的性質を示す。

3. 試験結果

図 3 にき裂角度が 180°、き裂深さ d/t が 0.91 のときの荷重、変位および破断点近くにおける圧力などの時間変化を示す。この例では、荷重はリガメント部の破壊とともに 50.0 kN から 40.2 kN に低下した。この時間は 0.1 s 程度である。

図 4 にき裂角度が 180° のときの荷重と試験体の荷重点変位との関係を示す。無欠陥の試験体では、最大荷重が 245 kN（最大モーメントが 85.8 kN・m）に達して崩壊した。き裂深さと板厚との比 d/t が 0.25 の試験体では最大荷重を超えた後破壊した。しかも、この最大値は、無欠陥試験体の最大値とほぼ一致した。 d/t が 0.5, 0.73, 0.91 と増加するにつれ破壊モーメントは減少した。破壊が生じるまでの荷重と試験体の荷重点変位との関係は欠陥材と無欠陥材とでほぼ同一である。図 5 に欠陥角度が 90° のときの荷重と荷重点変位

との関係を示す。破壊が生じるまでの荷重と試験体の荷重点変位との関係は欠陥材と無欠陥材とではほぼ同一である。360°のときも同様な結果が得られている。柴田ら⁽⁸⁾の常温試験の結果と比較して、無欠陥試験体のときは、最大荷重に達するときの変位は常温で 180 mm に対し、高温高压水では 280 mm と大きくなっている。これは内圧が試験体の崩壊を防ぐように作用するためであろう。また、 d/t が 0.25 のとき常温では破壊しなかったが、高温高压水下では壊れている。一方、 d/t が 0.5, 0.73 および 0.91 のときは常温の試験と比較して破壊荷重が低下するとともに荷重点変位も小さくなっている。これは破壊応力が高温では低下することを示すものである。

高温高压水を用いた試験の場合、欠陥付き試験体では、一部の欠陥形状を除いて高コンプライアンス試験を実施している。高コンプライアンス試験ではリガメントだけが壊れたものと周方向にもき裂が進行したものの 2 種類の結果が得られた。表 1 からき裂長さが短く、き裂深さが大きいほどリガメント破壊に終わる

傾向が認められた。周方向にき裂が伝ばした試験体の破面を調べた結果、き裂の安定成長を示す板厚に垂直な破面と 45° 傾いた破面とがあることが認められた。破面の一例を図 6 に示す。

4. 考 察

欠陥を有する配管が破壊するときの荷重は、Kanninen ら⁽⁹⁾の実断面応力基準によれば、欠陥のある配管断面が応力 σ_0 の一様な応力分布状態にあるとすると次式で表される。

$\beta_L < \pi - \theta$ のき裂形状で

$$M_L = 2R^2\sigma_0(2\sin\beta_L - x\sin\theta) \dots\dots\dots (1)$$

$$\beta_L = \frac{\pi - x\theta}{2} + \frac{\pi R_p}{4t\sigma_0} \dots\dots\dots (2)$$

$\beta_L \geq \pi - \theta$

$$M_L = 2R^2\sigma_0\{2(1-x)\sin\beta_L + x\sin\theta\} \dots\dots\dots (3)$$

$$\beta_L = \pi + \frac{1}{1-x}\left(\frac{x\theta - \pi}{2} - \frac{\pi R_p}{4t\sigma_0}\right) \dots\dots\dots (4)$$

ここで β_L はき裂断面の中立角、 p は内圧、 R は配管の平均半径、 $x = d/t$ である。

図 3 RUN 5714 試験の各種計測データ

図 5 欠陥角度が 90° のときの荷重と荷重点変位との関係

図 4 欠陥角度が 180° のときの荷重と荷重点変位との関係

図 6 RUN 6002 試験後の試験体の破壊状況

図 7 高温高圧水条件 (6.86 MPa, 285°C) 下での破壊モーメントとき裂角度との関係

また、貫通き裂の崩壊曲げモーメント M_B は、

$$M_B = 2R^2 t \sigma_0 (2 \sin \beta_B - \sin \theta) \quad (5)$$

$$\beta_B = \frac{\pi - \theta}{2} + \frac{\pi R_p}{4 t \sigma_0} \quad (6)$$

本論文では、応力 σ_0 は、流動応力すなわち降伏応力と引張強さとの和の 1/2 とした。図 7 に、実断面応力基準による計算値と破断モーメントの実験値との比較を無次元化して示す。図 7 から明らかなようにき裂角度が 180° 以上でき裂深さ d/t が 0.73 以下のときは予測値は安定側となる。一方、き裂角度が 90° のときは非安全側となる。図 8 に高コンプライアンス付き試験の結果を漏えいしたものと破断したものとに記号を区別して示す。無次元き裂深さと無次元き裂長さを座標軸とするグラフ上で両者は各グループに分かれているのがわかる。Kanninen らは貫通き裂に対する限界応力値を流動応力 $\sigma_f = 1.15(\sigma_y + \sigma_u)/2$ とし、表面き裂に対する限界応力値を貫通き裂の場合の 0.85 倍として M_B と M_L とを定義している。高コンプライアンス試験では、 $M_L > M_B$ のとき、破断に至ると考えられ Kanninen らによる破断と漏えいとの境界線を図 8 に示す。この境界線は安全側の予測曲線となるが、実験結果を正しく表していないことがわかる。これは、式 (1) が実験値と十分には一致しないことによるものと考えられる。

5. 結 論

165.2 mm ϕ , 11 mm t の試験配管を用いて高温高圧水下での四点曲げ試験を行った。その結果、次の主な

図 8 高コンプライアンス試験結果-漏えいと破断との境界線

結論を得た。

(1) き裂角度が 180° , d/t が 0.25 のときは最大荷重を超えた後に破断が生じる。

(2) 実断面応力基準による漏えいモーメント M_L を求める式はき裂角度が小さくなると安全側の予測を与えない。

(3) 高コンプライアンス試験において漏えいと破断との欠陥形状の境界は、Kanninen らが提案した方法で安全側の予測ができる。

(4) 高コンプライアンス試験で周方向にき裂が進展した場合、若干の安定き裂成長を示した後 45° 傾いたせん断型破面に移行する。

この成果は、科学技術庁からの受託研究「配管信頼性実証試験」の一部であることを付記する。また、本研究の実施にあたって日本原子力研究所、原子炉安全工学部、佐藤一男部長、下桶敬則次長には多大のご支援をいただいた。厚くお礼申し上げます。

文 献

- (1) Tada, H., ほか 2 名, NUREG/CR-0838 (1979).
- (2) Zahoor, A., ほか 1 名, ASME Paper, 80-WA/PVP-3 (1980).
- (3) Wilkowski, G. M., ほか 2 名, ASME Paper, 80-WA/PVP-3 (1980).
- (4) Zahoor, A., ほか 1 名, J. Eng. Mater. Tech., 103, (1981), 194.
- (5) Smith, E., Int. J. Pres. Piping, 12 (1983), 193.
- (6) Yagawa, G., ほか 5 名, 機論, 50-451, A (昭 59), 483.
- (7) 町田・ほか 2 名, 材料, 31-344 (昭 56), 24.
- (8) 柴田・ほか 5 名, 圧力技術, 24-5 (昭 61), 236.
- (9) Kanninen, M., ほか 8 名, EPRI NP-2347 (1982).