

B-45 局部減肉を有する炭素鋼配管の破壊挙動

Fracture Behavior of Carbon Steel Straight Pipes with Local Wall Thinning

○ 正 宮崎克雅 (日立機械研) 正 根布 景 (日立機械研) 正 菅野 智 (日立機械研)
 正 石渡雅幸 (日立日立) 正 長谷川邦夫 (日立日立)

Katsumasa MIYAZAKI, Mech. Eng. Res. Lab., Hitachi Ltd., Saiwai-cho3-1-1, Hitachi-shi, Ibaraki
 Akira NEBU, Mech. Eng. Res. Lab., Hitachi Ltd., Saiwai-cho3-1-1, Hitachi-shi, Ibaraki
 Satoshi KANNO, Mech. Eng. Res. Lab., Hitachi Ltd., Saiwai-cho3-1-1, Hitachi-shi, Ibaraki
 Masayuki ISHIWATA, Nuclear Systems Division, Hitachi Ltd., Saiwai-cho3-1-1, Hitachi-shi, Ibaraki
 Kunio HASEGAWA, Nuclear Systems Division, Hitachi Ltd., Saiwai-cho3-1-1, Hitachi-shi, Ibaraki

To evaluate the structural integrity of power plant piping, monotonic bending tests and low cycle fatigue tests were conducted on 100 mm diameter (100A) full-scale carbon steel pipe specimens with local wall thinning. The local wall thinning was simulated as an eroded part. From the monotonic bending tests in case that eroded area was subjected tensile stress, the fracture behavior at maximum moments was classified into two types, ovalization and crack initiation. To evaluate the difference of fracture behavior, the finite element analyses were conducted. Using the Mises strain at the maximum eroded area and multiaxial fracture strain estimated by modified Weiss's method, the difference of fracture behavior could be explained. From the low cycle fatigue tests, the fatigue strength of eroded pipes with 100 mm in eroded axial length, 0.5 in normalized eroded depth and 90 deg. in eroded angle is almost equal to the design fatigue curve in ASME B&PV Code Sec. III. To evaluate the local strain amplitude in the cyclic bending tests, finite element analyses were conducted. Using Mises strain amplitude and low cycle fatigue curve, the number of cycles to 25% moment decreasing of eroded pipes were evaluated, conservatively.

Key Words : Eroded Pipe, Fracture Behavior, Multiaxial Stress State, Low Cycle Fatigue Strength, Carbon Steel

1. 緒言

発電プラントにおいて高温高压水を内包する配管系の健全性を確保することは重要である。炭素鋼配管においては、プラント運転期間中の全面腐食による減肉量を予め見込んで、肉厚が設定される。しかしながら、エロージョン・コロージョンに起因して配管に局所的な減肉が生じた場合の配管の破壊形態、及び許容される管厚に関しては必ずしも明らかでない。以上のような背景を踏まえて、局部減肉の存在を想定した配管の強度健全性を検討するために、単調増加荷重、及び繰返し荷重にて、機械的に減肉模擬加工を施した炭素鋼直管を用いた 4 点曲げ破壊試験を実施した。また、減肉配管の破壊挙動を詳細に検討するために、単調増加荷重、及び繰返し荷重を受ける減肉配管を対象に有限要素法解析を実施した。

2. 試験方法

2.1 減肉配管試験体 減肉配管試験体として、呼び径 100A Sch.80 の高压配管用炭素鋼鋼管 STS410、及び高温配管用炭素鋼鋼管 STPT410 を用いた。減肉配管試験体の形状を図 1 に示す。試験体の中央部には、機械加工により内面に減肉部を設けた。単調増加荷重試験の場合、減肉深さ d は 1.7, 3.0, 4.3, 6.9 mm の 4 種類、減肉角度 2θ は 60, 90, 180° の 3 種類とした。また、繰返し荷重試験の場合、減肉深さ d は 4.3 mm の 1 種類、減肉角度 2θ は 90, 180° の 2 種類とした。なお、全ての試験条件において、減肉長さ l は 100 mm とした。

2.2 試験装置 単調増加荷重試験、及び繰返し荷重ともに試験には、油圧サーボ疲労試験機を用いた。試験装置の概要を図 2 に示す。減肉配管には、単調増加、または繰返し 4 点曲げ荷重を負荷した。配管の曲げ変形に伴い負荷点、及び支持点で発生すると考えられる逆曲げモーメントを防止

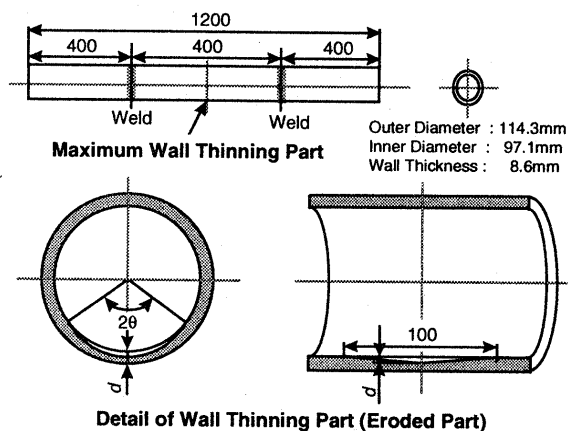


Fig. 1 Configuration of eroded pipe specimen.

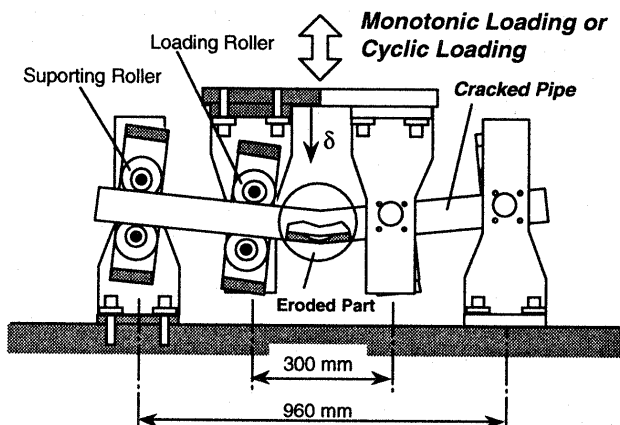


Fig. 2 Schematic of 4-point bending test equipment.

Table 1 Experimental variables and test results of monotonic bending test using eroded pipes

Specimen No.	Material	Configuration of Eroded Area					Maximum Moment $M_{\max}$ (kN-m)	Plastic Collapse Moment M_c^{-1} (kN-m)	$M_{\max}/M_c$	Fracture Behavior
		Eroded Depth d (mm)	d/t	Eroded Angle 2θ (deg.)	$2\theta/2\pi$	Eroded Length ℓ (mm)				
TP-1	STS410	1.7	0.2	180	0.50	100	39.6	34.9	1.13	Ovalization
TP-2		4.3	0.5	180	0.50		38.4	26.4	1.45	Crack Initiation
TP-3		6.9	0.8	180	0.50		29.5	15.9	1.86	Crack Initiation
TP-4		6.9	0.8	90	0.25		33.5	26.2	1.28	Crack Initiation
TP-5		3.0	0.3	180	0.50		38.8	30.9	1.26	Ovalization
TP-6		4.3	0.5	90	0.25		37.5	31.5	1.19	Ovalization
TP-7		4.3	0.5	60	0.17		38.6	34	1.14	Ovalization
TP-8		6.9	0.8	60	0.17		38.1	30.5	1.25	Crack Initiation

Table 2 Experimental variables and test results of cyclic bending test using eroded pipes

Specimen No.	Material	Configuration of Eroded Area					Controlled Displacement δ_a (mm)	Fictitious Stress Amp. S_a	N_{25} (Cycles)	Remarks
		Eroded Depth		Eroded Angle		Eroded Length ℓ (mm)				
		d (mm)	d/t	2θ (deg.)	$2\theta/2\pi$					
TP-22	STPT410	4.3	0.5	180	0.5	100	-12.0 - +10.8	-11.8 - +10.7	57	No ratcheting
TP-23				90	0.25		-9.1 - +7.7	-9.0 - +7.6	93	
TP-24							-11.9 - +11.0	-11.7 - +10.9	150	
TP-25							-17.2 - +16.8	-17.0 - +16.0	36	

するために、4点曲げ試験装置の負荷点、及び支持点には回転機構を設けた。

2.3 試験条件 単調増加荷重試験、及び繰返し荷重試験の試験条件をそれぞれ表1、及び表2に示す。全ての配管破壊試験は、室温大気中、内圧なしの条件において変位制御で試験を実施した。

3. 単調増加荷重試験の結果、及び考察

3.1 単調増加荷重試験の結果 単調増加荷重試験の結果を表1に示す。表中には炭素鋼配管 STS410 の破壊基準である¹⁾実断面応力基準に基づき次式で表される塑性崩壊モーメント M_c を併せて示した。

$$M_c = 2\sigma_f R^2 t \{ \cos(\theta/2) - \sin\theta \} \quad (1)$$

上式において、 R は配管の平均半径、 t は管厚、 σ_f は降伏応力と引張強さの平均値で表される流動応力を表す。なお、供試材である STS410 の室温における降伏応力は 326 MPa、引張強さは 490 MPa とした。表1に示したように、試験から得られた最大モーメント $M_{\max}$ は、全ての条件において塑性崩壊モーメント M_c よりも大きい。すなわち、実断面応力基準により減肉配管の最大荷重を保守的に評価することが可能であることが分かる。

ここで、最大モーメント負荷時の減肉配管の挙動を減肉配管の破壊挙動と定義すると、減肉形状の違いにより、配管の破壊挙動が異なることが分かる。減肉深さが大きく、かつ減肉角度が大きいほど、破壊形態は配管断面の偏平化（以下、断面偏平化と呼ぶ）から最大減肉部からのき裂発生（以下、き裂発生と呼ぶ）に移行する傾向が見られる。

破壊挙動が断面偏平化に分類される場合の負荷モーメント M と荷重線変位 δ の関係を図3に示す。き裂が発生しない場合、減肉部の寸法が異なっても負荷モーメントと荷重線変位の関係はほぼ等しい。一方、破壊挙動がき裂発生に分類される場合の負荷モーメント M と荷重線変位 δ の関係を図4に示す。図中の矢印はき裂が発生した時点を表し、き裂の発生により負荷モーメントが急激に低下している傾向を確認できる。また、き裂発生点は、減肉形状により異なることが分かる。

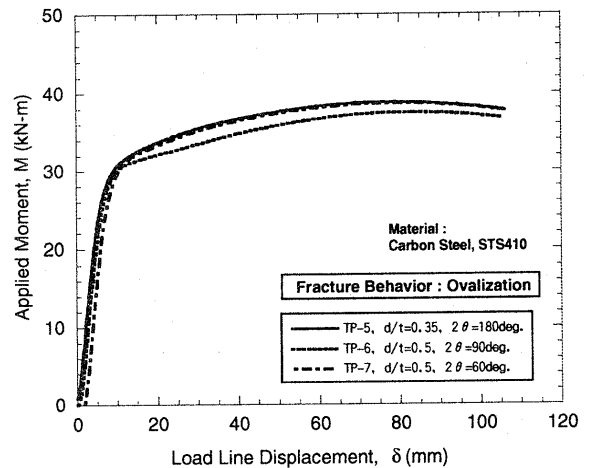


Fig. 3 Relationship between M and δ (Fracture Behavior: Ovalization).

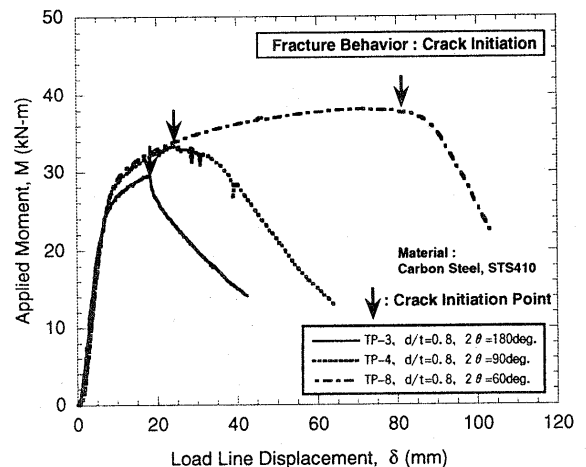


Fig. 4 Relationship between M and δ (Fracture Behavior: Crack Initiation).

3.2 有限要素法解析を用いた破壊クライテリアの検討

3.2.1 減肉配管における最大減肉部のき裂発生評価 減肉配管を用いた単調増加荷重試験の結果から、減肉配管の破壊形態は断面偏平化とき裂発生に分類されることが分かった。そこで、本報では減肉形状の違いが破壊形態の違いに及ぼす影響を検討するために有限要素法解析により、最大減肉部における局所ひずみを用いて、破壊クライテリアの評価を行った。

3.2.2 解析条件 有限要素法解析に用いた有限要素分割例を図5に示す。解析モデルは減肉配管試験体の対称性を考慮して減肉配管 1/4 モデルを用いた。解析における境界条件は、図2に示した4点曲げ荷重を受ける配管と等価条件となるように設定した。解析に用いた応力とひずみの関係には、供試材である STS410 の真応力と真ひずみの関係を用いた。なお、非線形有限要素法解析プログラムには汎用コードである ADINA Ver.6.1 を用いた。

3.2.3 多軸応力場における真破断延性評価手法の提案 一般的に多軸応力場においては単軸応力場と比較して真破断延性が低下する。Weiss は多軸応力場における破壊クライテリアとして、静水圧応力が限界静水圧応力に達したときに破壊が生じるとした静水圧応力クライテリアを用いて多軸応力場における真破断延性を定式化している²⁾。応力とひずみの関係が n 乗硬化則により表されると仮定した場合、多軸応力場における真破断延性 ϵ_{mf} と単軸応力場における真破断延性 ϵ_{uf} の間には次式の関係が成立する。

$$\epsilon_{mf} = (\omega m)^{1/n} \cdot \epsilon_{uf} \quad (2)$$

$$m = \sqrt{(1 + \alpha + \beta)^2 - 3(\alpha + \beta + \alpha\beta)} \quad (3)$$

$$\omega = 1/(1 + \alpha + \beta), \quad \alpha = \sigma_2/\sigma_1, \quad \beta = \sigma_3/\sigma_1 \quad (4)$$

上式において、 σ_1 、 σ_2 、及び σ_3 は主応力、 n は n 乗硬化則で応力とひずみの関係を近似したときの材料定数を表す。

Weiss は材料の応力とひずみの関係は n 乗硬化則に従うと仮定して式(2)を導いた。しかしながら、最大減肉部における最大荷重時の応力とひずみの関係は、 n 乗硬化則で表現することが困難な領域までひずみが増加すると考えられる。そこで、応力とひずみの関係を低ひずみ領域から高ひずみ領域まで連続的に表現できるように、本報では、Ramberg-Osgood 近似式³⁾を使って応力とひずみの関係を近似することを試みた。このとき、多軸応力場における真破断延性 ϵ_{mf} と単軸応力場における真破断延性 ϵ_{uf} の間には次式の関係が成立する。

$$\epsilon_{mf} = \frac{\left(\frac{\omega m \sigma_{uf}}{\sigma_0}\right) + \alpha \left(\frac{\omega m \sigma_{uf}}{\sigma_0}\right)^n}{\left(\frac{\sigma_{uf}}{\sigma_0}\right) + \alpha \left(\frac{\sigma_{uf}}{\sigma_0}\right)^n} \epsilon_{uf} \quad (5)$$

$$\epsilon_0 = \sigma_0 / E, \quad \sigma_0 = \sigma_y / E$$

上式において、 E はヤング率、 σ_y は降伏応力、 α 、及び n はRamberg-Osgood 近似式で、ひずみが真破断延性近傍の領域まで応力とひずみの関係を近似した場合の材料定数を表す。本報では、多軸応力場における真破断延性は式(5)により表現できるとした。

3.2.3 解析結果 破壊挙動がき裂発生となった試験体番号 TP-4 を対象とした解析結果を図6に示す。図6(a)では、荷重線変位の増大に伴う最大減肉部内表面における Mises

相当ひずみの変化、及び式(5)を示した多軸応力場における真破断延性の変化を示した。荷重線変位の増大に伴い Mises 相当ひずみは増大するが、多軸応力場における真破断延性は低下している傾向が確認できる。荷重線変位が約 27 mm となる点において、Mises 相当ひずみと多軸応力場における真破断延性が交差する。すなわち、この点で減肉配管においてき裂が発生すると考えられる。図6(b)には、試験体番号 TP-4 の負荷モーメントと荷重線変位の関係に対する解析結果と実験結果を比較した結果を示した。解析結果と実験結果は良い一致を示す。また、試験体番号 TP-4 の

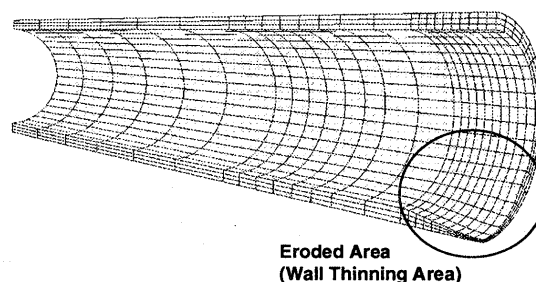
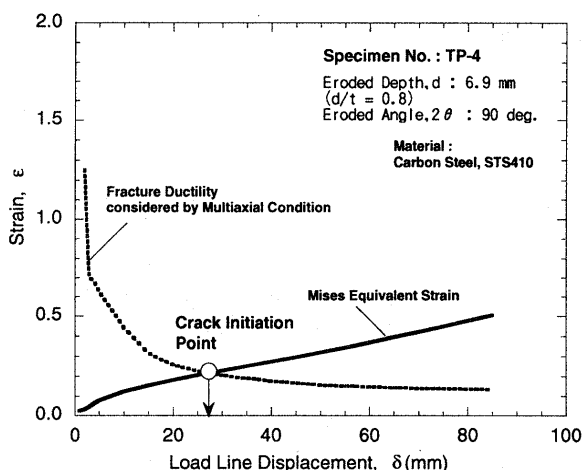
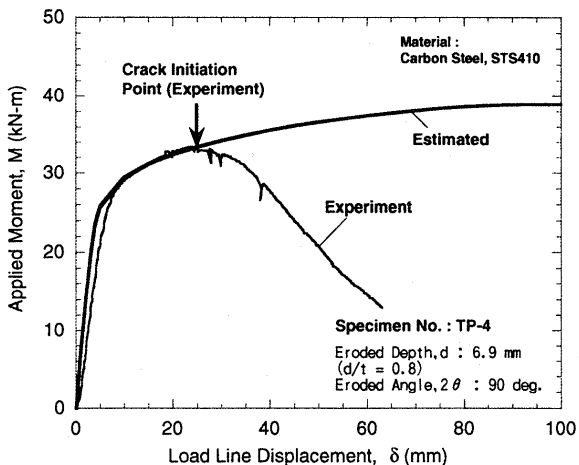


Fig. 5 Example of mesh pattern (Specimen No. TP-4)

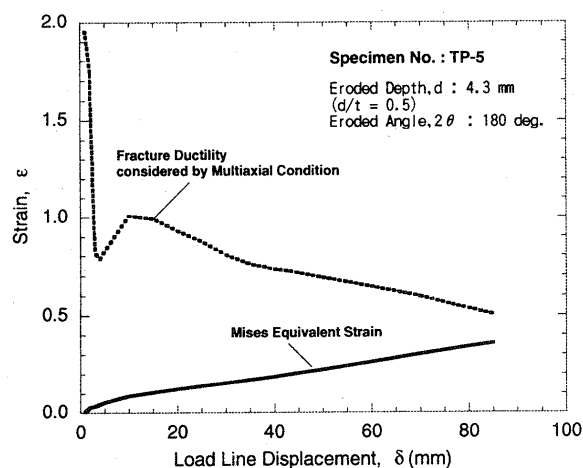


(a) Relationship between Strain and Ductility

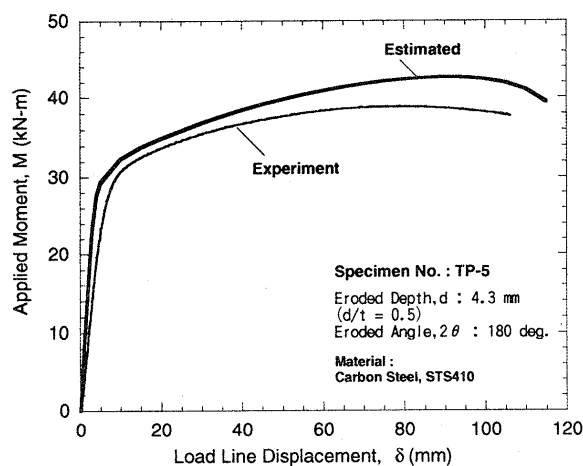


(b) Moment - Applied Displacement Curve

Fig.6 Comparison of Estimation to Experimental Results (Specimen No. TP-4, Fracture Behavior : Crack Initiation)



(a) Relationship between Strain and Ductility



(b) Moment - Applied Displacement Curve

Fig.7 Comparison of Estimation to Experimental Results (Specimen No. TP-5, Fracture Behavior: Ovalization)

場合、最大減肉部から最大き裂が発生したときの荷重線変位は約 25 mm であることが分かる。図 6 (a) で示したように最大減肉部における Mises 相当ひずみと多軸応力場における真破断延性を比較したところ、荷重線変位が約 27 mm の点でき裂が発生したという結果を得ることができた。すなわち、き裂発生時の荷重線変位を最大減肉部における Mises 相当ひずみと多軸応力場における真破断延性を比較することにより評価することができる。なお、破壊形態が断面偏平化となった試験体番号 TP-5 を対象とした解析結果を図 7 に示す。図 7 (a) に示すように、荷重線変位の増大とともに Mises 相当ひずみは増大し、多軸応力場における真破断延性は低下するものの、荷重線変位が 90 mm 程度では、この両者は交差しない。すなわち、試験体番号 TP-5 の場合、最大減肉部においてき裂は発生しないと考えられる。図 6 (b) には、試験体番号 TP-5 の負荷モーメントと荷重線変位の関係に対する解析結果と実験結果を比較した結果を示した。解析結果と実験結果は良い一致を示すとともに、試験体番号 TP-5 の場合、き裂の発生がないことが確認される。

以上より、最大減肉部における Mises 相当ひずみと多軸応力場における真破断延性を比較することにより、減肉形状によらず、減肉配管の破壊形態を評価できる見通しが得られた。

4. 繰返し荷重試験の結果、及び考察

4.1 繰返し荷重試験の結果 繰返し荷重試験における減肉配管の破壊形態の例を図 8 に示す。内圧が存在する条件下、繰返し荷重を受ける減肉配管の破壊形態は、減肉部における局所的なラチェット変形を伴う³⁾。しかしながら、本報では、内圧なし条件にて繰返し荷重試験を実施したことから、繰返し荷重を負荷した全ての減肉配管の破壊形態は、最大減肉部におけるラチェット変形を伴うことなく、最大減肉部内面から発生したき裂が周方向へ進展する形態となった。一例として、試験体番号 TP-22 における負荷モーメントと繰返し数の関係を図 9 に示す。繰返し負荷開始当初は、繰返し数の増大に伴う負荷モーメントの変化は見られないが徐々に繰返し数の増大に伴い負荷モーメントが低下する傾向が確認される。本報では、繰返し荷重試験における減肉配管の破断繰返し数は、所定変位振幅 δ_a を減肉配管に負荷した場合に発生する初期モーメントに対して、発生モーメントが 25% 低下した時点の繰返し数 N_{25} として定義した。表 2 中に、各減肉配管試験体の破断繰返し数 N_{25} を示した。負荷モーメントと荷重線変位の関係を図 10 に示す。減肉配管の負荷モーメントと荷重線変位の関係はヒステリシスループを描くことが分かる。また、繰返し数の増大に伴い、ヒステリシスループの面積は、徐々に小さくなる傾向が確認できる。

ASME Boiler & Pressure Vessel Code Sec. III⁴⁾ (以下、ASME Sec. III と呼ぶ) における疲労評価は、仮想応力振幅 S_a を用いて行われる。 S_a は、配管を弾性梁とみなして得られる負荷点における弾性たわみ δ_e に対する弾性モーメント M_e から算出される。表 2 には、繰返し荷重試験における S_a を併せて示した。なお、本試験では、あくまでも、減肉配管を健全配管とみなして S_a を算出した。繰返し荷重試験から得られた S_a と破断繰返し数 N_{25} の関係を図 11 に示す。図中には、ASME Sec. III における引張強さが 80 ksi (= 550 MPa) 以下のフェライト鋼の設計疲れ曲線を併せて示した。無次元化減肉深さ d/t が 0.5、減肉角度 2θ が 180° の場合、破断繰返し数は、設計疲れ線図で想定される破断繰返し数よりも若干、低くなる。しかしながら、 d/t が 0.5、 2θ が 90° の場合、破断繰返し数は設計疲れ線図で想定される破断繰返し数と

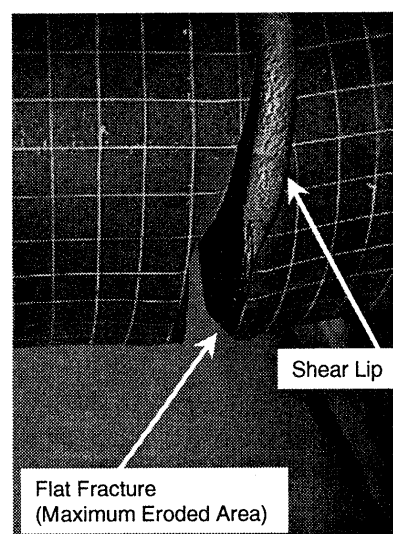


Fig. 8 Fracture behavior of eroded pipe subjected

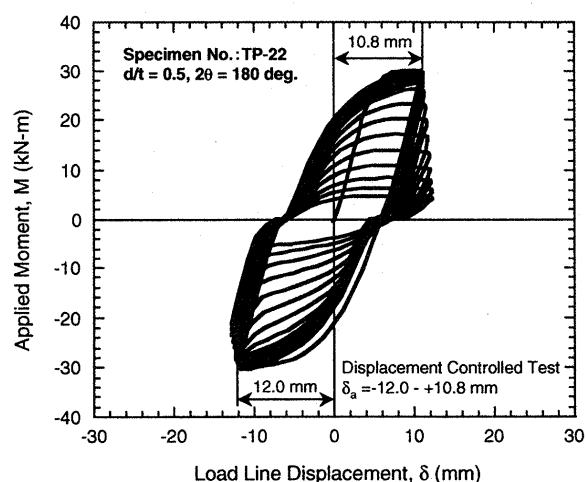


Fig. 9 Relationship between applied moment and load line displacement (Specimen No. TP-22).

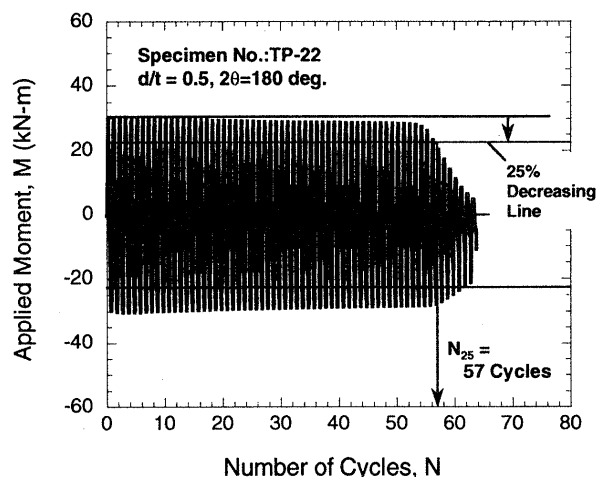


Fig. 10 Relationship between applied moment and number of cycles (Specimen No. TP-22).

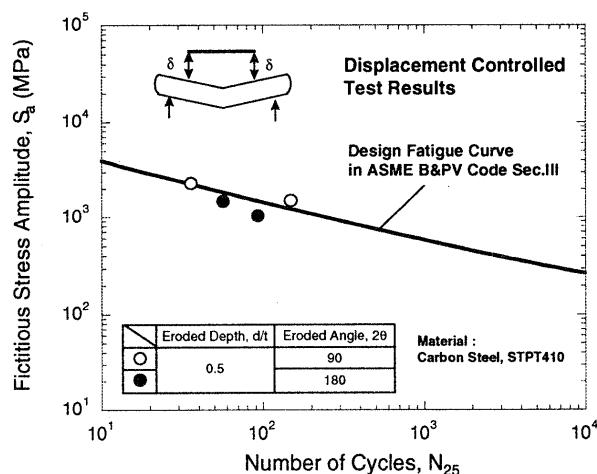


Fig. 10 Fatigue design evaluation of eroded pipe using fictitious stress, S_a.

ほぼ同等である。これより、内圧なし室温大気中条件においては、健全配管とみなして評価した場合、減肉長さ l が100 mm、 d/t が0.5、 2θ が90°の減肉形状を有する配管は現行設計手法における設計疲れ線図が成立する範囲であると考えられる。

4.2 局所ひずみを用いた低サイクル疲労評価

4.2.1 供試材の低サイクル疲労曲線の推定

繰返し荷重を受ける減肉配管に対して、低サイクル疲労評価の成立性を検討するために、有限要素法解析から得られた減肉配管の最大減肉部における局所ひずみ、及び繰返し荷重試験から得られた破断繰返し数 N_{25} を用いた低サイクル疲労評価を実施した。

繰返し荷重試験の供試材である STPT410 の低サイクル疲労曲線は、次式で表される Manson の提案するユニバーサルスロープ法⁵⁾を用いて近似した。

$$\Delta \varepsilon_f = \frac{3.5\sigma_B}{E} N_f^{-0.12} + \varepsilon_f^{0.6} N_f^{-0.6} \quad (6)$$

上式において、 $\Delta \varepsilon_f$ は全ひずみ範囲、 σ_B は供試材の引張強さ、 ε_f は真破断延性、 E はヤング率を表す。なお、中実丸棒試験片を用いた引張試験から得られた本供試材 STPT410 の室温大気中における引張強さ σ_B は468 MPa、真破断延性 ε_f は1.12であった。

4.2.2 局所ひずみ振幅による破断繰返し数の評価 各繰返し荷重試験を対象に有限要素法解析を実施して、最大減肉部における局所ひずみ範囲を評価した。なお、図8に示した繰返し荷重試験における減肉配管の破壊形態から、周方向き裂は最大減肉部内面から発生したことが判明した。そこで、有限要素法による局所ひずみの評価対象部位は最大減肉部内面とした。

有限要素法解析における有限要素分割、及び境界条件等の解析条件は、基本的に、前述した単調増加荷重試験を対象とした有限要素法解析条件と同様である。但し、解析における材料の硬化則としては、移動硬化則を用いた。なお、本報では、低サイクル疲労評価上の最大減肉部における局所ひずみ範囲としては、Mises 相当ひずみ範囲 $\Delta \varepsilon_{\text{mis}}$ を用いた。また、有限要素法解析では、変位制御条件の繰返し負荷を数サイクル負荷することにより得られる Mises 相当ひずみ範囲 $\Delta \varepsilon_{\text{mis}}$ の平均値を、評価上の Mises 相当ひずみ範囲 $\Delta \varepsilon_{\text{mis}}$ とした。

前述のように定義した繰返し荷重試験から得られる減肉配管の破断繰返し数 N_{25} と有限要素法解析から得られる Mises 相当ひずみ範囲 $\Delta \varepsilon_{\text{mis}}$ の関係を図11に示す。図中には、式(6)で表される供試材 STPT410 の低サイクル疲労曲線を併せて示した。繰返し荷重試験における減肉配管の破断繰返し数は、低サイクル疲労曲線よりも上方にプロットされることが確認できる。すなわち、Mises 相当ひずみ範囲 $\Delta \varepsilon_{\text{mis}}$ 、及び低サイクル疲労曲線を用いることにより、減肉配管の破断繰返し数を保守的に評価できることが示唆される。

5. 結言

本研究により以下の結言が得られた。

- (1) 単調増加荷重試験から、減肉配管の破壊形態は、単純に断面が偏平化する場合(断面偏平化)とき裂が発生する場合(き裂発生)に分類された。また、減肉配管の最大モーメントは実断面応力基準に基づく塑性崩壊モーメントよりも大きいことが分かった。
- (2) 単調増加荷重試験を対象とした有限要素法解析結果から、最大減肉部における Mises 相当ひずみと多軸応力場にお

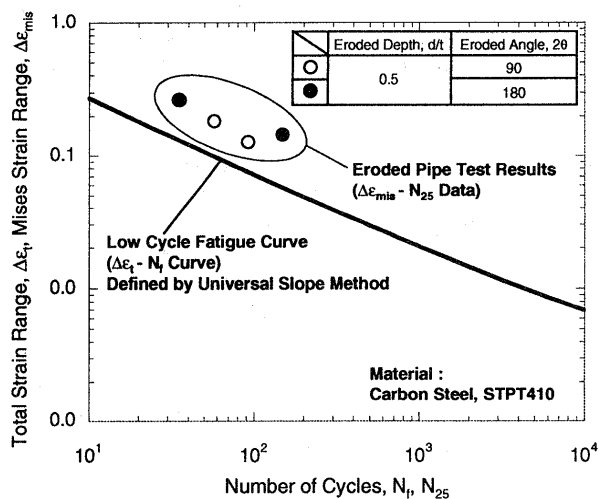


Fig. 11 Low cycle fatigue evaluation of eroded pipe using Mises strain range at maximum eroded area estimated by FEM.

ける真破断延性を比較することにより，単調増加荷重を受ける減肉配管の破壊形態を評価できる見通しが得られた。

(3) 繰返し荷重試験において， d/t が 0.5、 2θ が 90° の場合、健全配管とみなして評価した減肉配管の破断繰返し数は，ASME Sec.Ⅲにおける設計疲れ線図で想定される破断繰返し数とほぼ同等であった。

(4) 内圧なしの条件で繰返し荷重を受ける減肉配管の破断繰返し数は，減肉配管の Mises 相当ひずみ範囲 $\Delta\epsilon_{mis}$ ，及び低サイクル疲労曲線を用いることにより，減肉配管の破断繰返し数を保守的に評価できる見通しが得られた。

参考文献

- 1) Miyazaki, K., et al., ASME PVP, Vol.323, 241-248, (1996).
- 2) Weiss V., Proceeding 1st Int. Conf. on Mechanical Behavior of Materials, 458-474, (1972).
- 3) 大谷ら，機講論，No.99-1，145-146，(1999).
- 4) ASME, Boiler & Pressure Vessel Code Sec.Ⅲ，(1997).
- 5) 日本機械学会編，“金属材料 疲労強度の設計資料Ⅳ 低サイクル疲労強度”，(1983).