

## 船積輸送したシームレス鋼管の損傷解析

技術報告

八木 明\*・西田新一\*・東山博吉\*  
 浦島親行\*・梶木悦治\*<sup>2</sup>・岡田英樹\*<sup>3</sup>

## Failure Analysis of Seamless Line Pipe during Transportation by Ship

Akira YAGI, Shin-ichi NISHIDA, Hirokichi HIGASHIYAMA,  
 Chikayuki URASHIMA, Etsuharu KAJIKI and Hideki OKADA

## Synopsis :

Break out had happened during field hydraulic test of unused line pipe. The observation of failure pipe indicated presence of the pre-damage at the broken portion. We supposed that the damage would have occurred during manufacturing or shipping. From analysis of fracture surface and failure section, following facts were revealed

- (1) The cracks propagate in wall thickness direction independently of the metal-flow of hot rolling direction.
- (2) The crack initiation sites are the external and the internal surfaces of the pipe and the cracks propagate stepwise with smooth fracture surface.
- (3) In the fracture surface, many corrosion products are observed and clear striations are locally recognized.

It was concluded that the failure was caused by fatigue crack during shipment. This mechanism was confirmed by the pulsating bending fatigue test of pipes.

## 1. 緒 言

石油、天然ガス等のエネルギー資源の枯渇化により、近年その開発の場が、陸地から海洋へあるいは温暖な地から極地へと移る傾向にある。このようなエネルギー資源開発事情の変化に伴って、これまであまり経験のない種々の問題が見うけられるようになった。

ここで取り上げた問題は、北米アラスカに敷設したばかりの天然ガス輸送用パイプラインの使用前に行う水圧試験において、目標値よりかなり低い水圧値で、水洩事故が発生したことに關するものである。事故当初、この原因については、パイプ製造時の欠陥によるのではないかと、この見方が現地でなされていたが、その後の調査から、当該パイプについては製造後の品質検査で全く異常がなかったこと、および水洩発生部に外部からの損傷が認められたこと、等からパイプ製造後に起こったトラブルによる可能性が高くなった。

本報告は、水洩発生部の調査、解析および水洩発生部

に認められたき裂の発生、伝播のメカニズムに關するもので、水洩事故の主要原因が船積輸送中に起こった損傷によることを明らかにした。

## 2. 調査、実験方法

## 2.1 水洩発生部の調査

水洩発生部は全ラインで5箇所あり、それらのすべてについてマクロ調査（外観調査、X線試験、磁粉探傷試験、サルファー偏析調査）および破断部の断面組織観察、破面観察等のミクロ調査を行つた。ミクロ調査には、光学顕微鏡、走査型電子顕微鏡、EPMA (Electron Probe X-ray Micro Analyzer) を用いた。

## 2.2 室内実験

水洩発生部に損傷が認められたため、その部分に加わつたと思われる荷重条件をあらかじめ試算し、その結果をもとに、両振り平面曲げ疲労試験および実管片振り曲げ疲労試験を行つた。前者は当該パイプの疲労強度を簡易的に求めるもので、水洩発生パイプの健全部から切

昭和 59 年 4 月本会講演大会にて発表 昭和 60 年 1 月 30 日受付 (Received Jan. 30, 1985)

\* 新日本製鉄(株)八幡技術研究部 (Yawata R & D Lab., Nippon Steel Corp., 1-1-1 Edamitsu Yahata-higashi-ku Kitakyushu 805)

\*<sup>2</sup> 新日本製鉄(株)八幡製鉄所 (現: 新日本製鉄(株)東京製造所) (Yawata Works, Now Tokyo Works, Nippon Steel Corp.)

\*<sup>3</sup> 新日本製鉄(株)八幡製鉄所 (現: 日鉄リード(株)) (Yawata Works, Nippon Steel Corp., Now Reed Nippon Corp.)

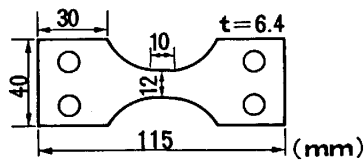


Fig. 1. Plain bending fatigue test specimen.

Table 1. Plain bending fatigue test conditions.

Apparatus : Schenck type plain bending fatigue testing machine.		
Load	Frequency	Repeated stress
Fully alternating load	1500 cpm	H-1 : 280 MPa H-2 : 300 MPa H-3 : 350 MPa

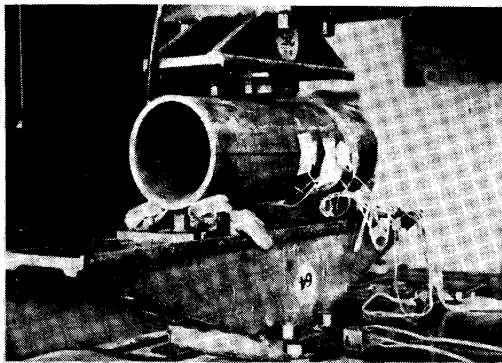


Photo. 1. Pulsating bending fatigue test of pipe.

Table 2. An example of pulsating bending fatigue test conditions.

Pipe size; 6 <sup>5</sup> / <sub>8</sub> "(OD) × 0.375"(WT) × 20"(Length)		
Apparatus; Schenk type tension-compression fatigue testing machine.		
Load	Frequency	Repeated stress
Constant load amplitude	1300 cpm	300 MPa

り出した Fig. 1 の試験片について行つた。試験条件を Table 1 に示す。後者は船輸送中のパイプの特定の部位に集中的な荷重が加わつた場合を想定して、Photo. 1 に示すような 3 点支持曲げ法により行つた。試験条件を Table 2 に示す。供試材は、水洩発生パイプと同一鋼種のものを用いた。また、負荷時のパイプ各部位の応力状態をひずみゲージにて測定した。以上の室内実験材については、実験後にマクロおよびミクロ観察を行い、水洩発生部のそれらと比較検討した。

2.3 水洩発生パイプの材質調査

水洩発生部近傍の健全部について、引張り、硬さ、衝撃試験およびミクロ組織観察を行い、材質欠陥の有無を

調査した。

3. 調査結果および実験結果

3.1 水洩発生状況

フィールドでの水圧試験中の水洩発生状況を Table 3 に示す。いずれのパイプにおいても、パイプ出荷前の試験圧力の 15~40% で水洩れが発生している。

また、その位置はパイプ内の特定の部位に限られておらず、パイプサイズも特定のものではなかつた。

3.2 水洩発生部のマクロ観察

Photo. 2 に水洩発生部の外観状況の一例を示す。水洩発生部には、局所的な凹みが見られ、パイプの長手方向に沿つた鋭いき裂が数箇所認められる。このような局所的な凹み、き裂は他の水洩発生部にもみられ、これらの損傷が、同じような状況下で起こつたことが考えられる。また、非破壊試験結果から凹み、き裂等の損傷は、水洩発生部のみであることがわかつた。

Table 3. Failure pressure and position on field hydraulic test.

Sym-bols	Pipe size	Hydraulic test		Failure position
		Factory inspection	Failure pressure	
A	φ6 <sup>5</sup> / <sub>8</sub> " × 0.375" <sup>WT</sup>	6630psi (45.7MPa)	2525psi (17.4MPa)	
B	φ6 <sup>5</sup> / <sub>8</sub> " × 0.375" <sup>WT</sup>	4420psi (30.5MPa)	1065psi (7.3MPa)	
C	φ6 <sup>5</sup> / <sub>8</sub> " × 0.375" <sup>WT</sup>	4420psi (30.5MPa)	1065psi (7.3MPa)	
D	φ6 <sup>5</sup> / <sub>8</sub> " × 0.375" <sup>WT</sup>	4420psi (30.5MPa)	770psi (5.3MPa)	
E	φ16" × 0.406" <sup>WT</sup>	2970psi (20.5MPa)	No information	No information

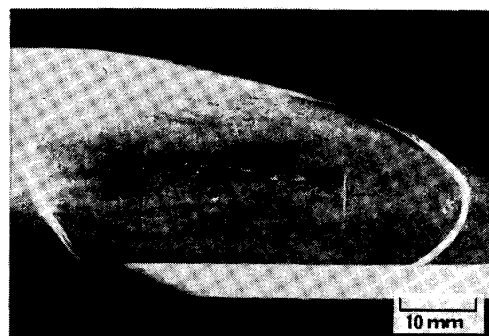


Photo. 2. Macro photograph of failure pipe (pipe B).

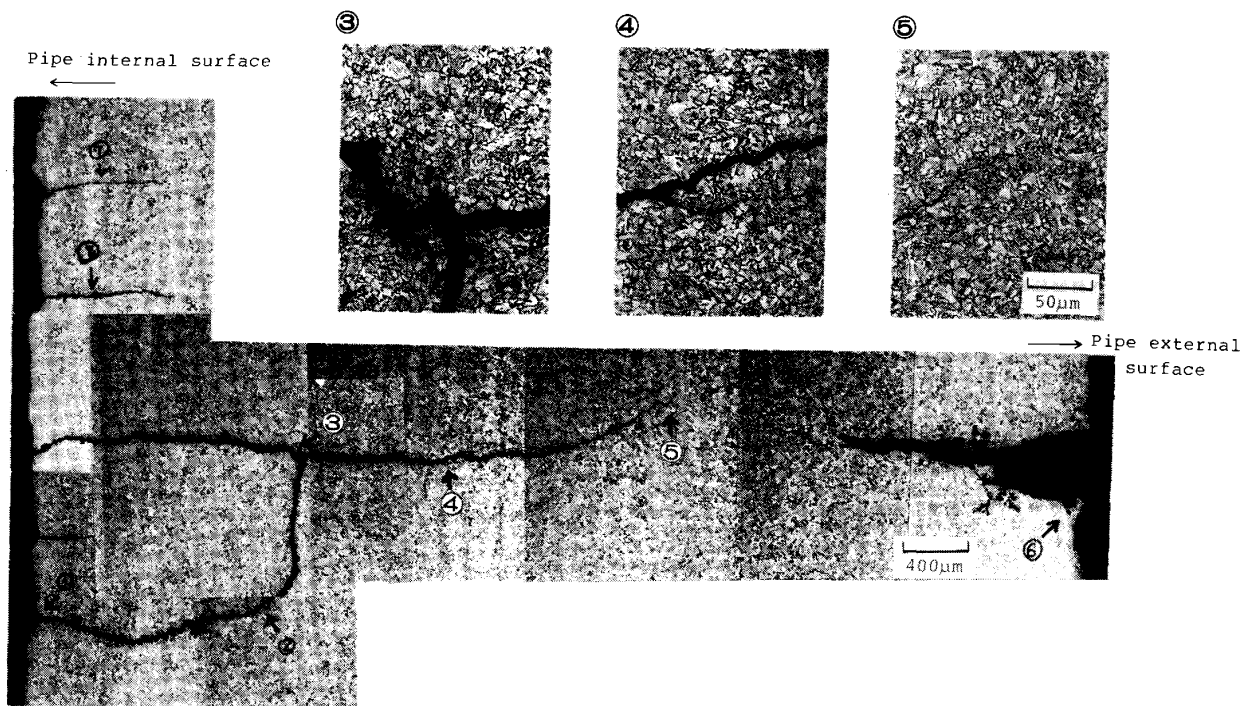


Photo. 3. Microstructure of failure section (pipe B).

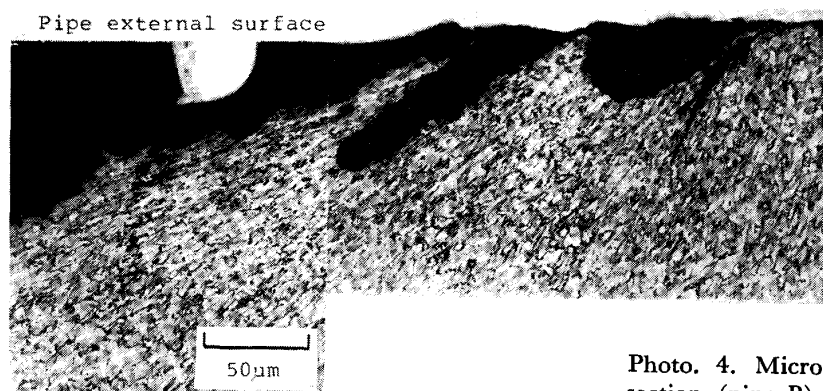


Photo. 4. Microstructure of failure section (pipe B).

### 3.3 損傷部の断面観察

Photo. 3 に損傷部に認められたき裂の断面写真の一例を示す。き裂は、パイプの外表面と内表面の両方から発生し、肉厚中心方向にほぼ垂直に、フェライト粒内および粒界を伝播しており、途中で枝分かれしたものもある。また、き裂の内部は、その先端部まで酸化生成物がみられるが、き裂周辺部の脱炭は認められない。Photo. 4 は、損傷の外表面近傍を示したもので、冷間での加工によると思われる組織のひずみが認められる。Photo. 5 は、パイプ製造時の圧延メタルフローを示したもので、き裂は、圧延メタルフローとは無関係に進展していることがわかる。以上のミクロ観察状況は、他の水洩発生部についても同様である。したがって、水洩発生部の損

傷、き裂の発生時期は、以上述べた状況証拠から、パイプの製造工程（加熱-圧延-熱処理-精整-品質検査）以後であることが推察される。すなわち、パイプがその輸送中にパイプの外表面、内表面の両方からき裂が発生し、伝播するような応力状態に保持され損傷したことが考えられる。

### 3.4 破面観察

損傷部の破面は、いずれも腐食が激しいため、あらかじめインヒビターを入れ酸洗処理を行い観察した。Photo. 6 に破面写真の一例を示す。き裂は、パイプの外表面と内表面の両方から発生し、この破面では最終破断位置は、ほぼ肉厚の中心付近となっている。また、破面は比較的なめらかで、伝播の過程でき裂同士が連なつ

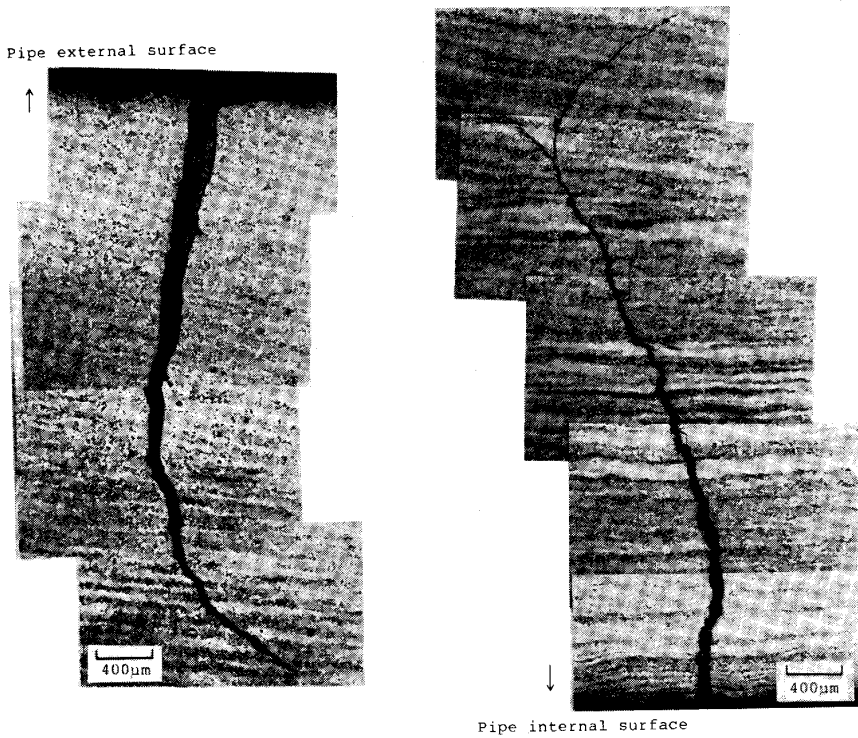


Photo. 5. Metal flow of failure section (pipe A).

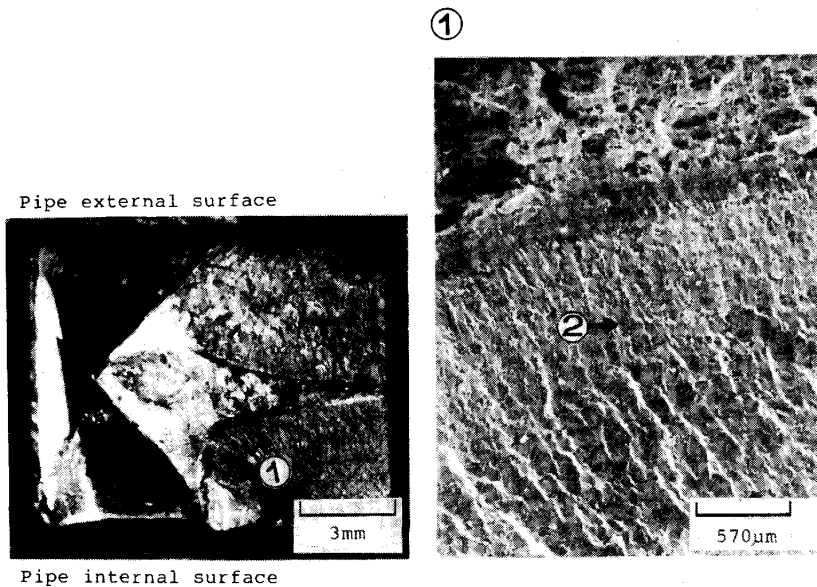


Photo. 6. Macro and micro fracture surface of failure (pipe E).

た状態となっており、このような形態は、繰り返し荷重下で起こる疲労破面と非常に似かよっている。Photo. 7 (a)は、破面をさらに高倍率で観察した結果である。破面には、腐食ピットが多くみられるが、脆性的な破壊様式は全く認められない。Photo. 7 (b)は、ごく限られた部位ではあるが、き裂の伝播方向に対して垂直な線状模様を観察した結果である。この線状模様は、疲労破面に現れる Striation と判断され、前述のマクロ的な破面形態とも考え合わせると、水洩発生部の損傷は、繰り返

し荷重により起こった疲労破壊であると考えられる。ここで、線状模様のところどころに平坦な部分が認められるが、これはき裂が発生した後に相手破面と接触したため疲労破面がつぶされてできたものと考えられる。したがって、この線状模様は、疲労破壊による Striation と判定して間違いのないであろう。なお、他の水洩発生部については、腐食が激しいためかこのような線状模様は観察されなかつた。また、き裂断面および破面についての EPMA の結果、介在物の存在、痕跡はみられず母材部

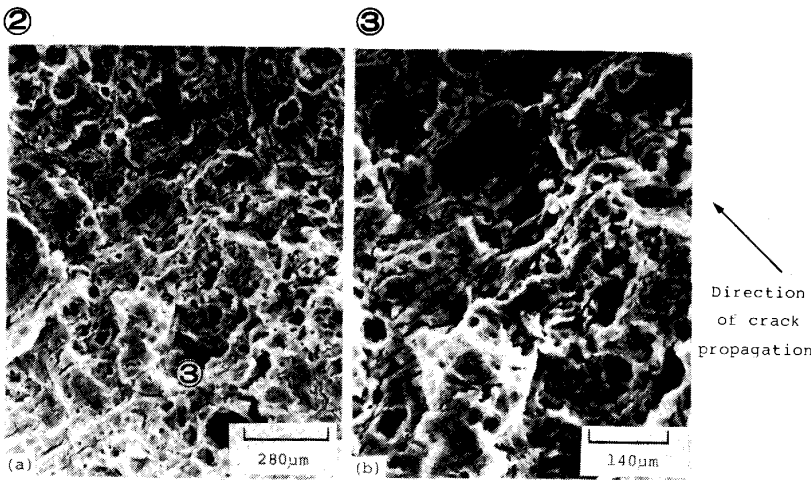


Photo. 7. Micro fracture surface of failure pipe (pipe E).

の材質的欠陥も全くなかった。

以上、水洩発生部の観察結果および材質調査結果から、き裂の発生、伝播に直接関与した主原因は、パイプ出荷後の輸送中に起こった疲労破壊であると推定できる。

#### 4. 損傷のメカニズム

水洩発生部の観察結果から、パイプの損傷は製管、出荷以後に発生した疲労破壊であることが明らかとなった。その発生時期としては、日本からアラスカまでの船輸送中が考えられる。しかしながら、欠陥の全くないパイプが輸送中の繰り返し荷重で、疲労破壊する可能性があるのか、またパイプ同士あるいはパイプと異材との接触により、パイプの外表面側に押付荷重が加わった場合、なぜパイプの外表面と内表面の両方からき裂が発生し伝播する現象が起こるのか、等の説明がなされていない。そこで、今回のパイプ損傷メカニズムを解明するため、以下の室内実験を行った。

##### 4.1 パイプの疲労特性

パイプの損傷が疲労破壊によることがわかったので、まずパイプ母材の疲労特性を調べた。Fig. 2 にその結

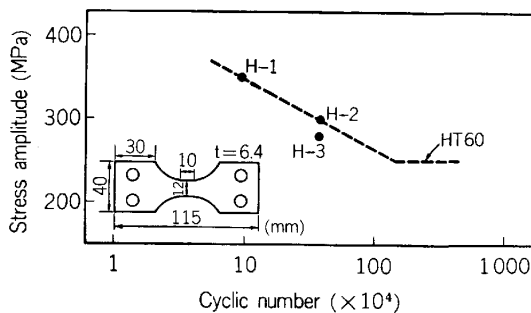


Fig. 2. Relation between cyclic number and stress amplitude on plain bending fatigue test.

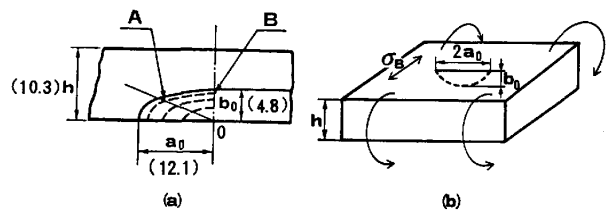
果を示す。同図から、パイプ母材の疲労特性は、同程度の強度レベルである HT 60 材の特性と一致した結果が得られており、今回の事故パイプ材が疲労特性からみても、全く問題のないものであつたと言える。

##### 4.2 輸送中の繰り返し荷重条件の推定

実管による室内実験に先立ち、水洩発生パイプに加わった荷重条件を、その損傷破面からの破壊力学的手法により推定した。対象は、Striation が認められた損傷破面 (Photos. 6 および 7) である。Fig. 3 は、その破面でのき裂伝播状態を模式的に示したものである。A 点は、Striation が認められた位置であり、B 点は、計算上の評価位置である。計算にあたっては、き裂が楕円状に伝播したと仮定し、曲げモーメントが働く部分に表面切り欠きが存在した場合の解として、RAJU & NEWMAN<sup>1)</sup> や石田ら<sup>2)</sup> の式があるが、ここでは石田らの厳密解を用いる。彼らの解では、切欠最深部の K 値は (1) 式で与えられる。

$$K = \sigma_B \sqrt{\pi l} A \dots \dots \dots (1)$$

ここで、 $\sigma_B$ : 曲げによる表面応力  $l$ : き裂深さ  
 $A: 1.1359 - 0.3929\mu - 0.3440\mu^2 + 0.2613\mu^3 +$   
 $\lambda(-1.5184 + 0.4178\mu + 0.7846\mu^2 - 0.6329\mu^3) +$   
 $\lambda^2(4.3721 - 13.9152\mu + 16.2550\mu^2 - 6.4894\mu^3 +$   
 $\lambda^3(-3.9502 + 12.5334\mu - 14.6137\mu^2 + 5.8110\mu^3),$



(A) Measured position of striation  
 (B) Evaluated position of striation

Fig. 3. Failure model of pipe.

$\mu : l/a$  ( $2a$  = 切り欠きの幅)  $\lambda : l/h$  ( $h$  = パイプ肉厚)

また、き裂の伝播速度は、

$$dl/dN = C(\Delta K)^m \dots\dots\dots (2)$$

ここで、 $N$  : 繰り返し数  $C, m$  : 材料定数 ( $C = 1.0 \times 10^{-10}, m = 3$ )<sup>3)</sup>

一方、A点における Striation 間隔  $S_A$  は Photo. 7 から、 $S_A = 1.0 \times 10^{-3}$  mm よつて、 $S_A = dl/dN$  とおき (2)式に代入すると、A点における  $K$  値は、

$$\begin{aligned} \Delta K_A &= (1.0 \times 10^{-3} / 1.0 \times 10^{-10})^{1/3} \\ &= 215.4 \text{ kg/mm}^{3/2} [66.8 \text{ MPa m}^{1/2}] \end{aligned}$$

この値を、半楕円表面き裂を有する平板に曲げが負荷するとして、き裂最深部 (Fig. 3, B 点) の  $K$  値に、SMITH の解<sup>4)</sup> を用いて換算すると、

$$\Delta K_B = 0.5 \times \Delta K_A = 107.7 \text{ kg/mm}^{3/2} [33.4 \text{ MPa m}^{1/2}]$$

となり、この値から石田らの厳密解 (2) 式により繰り返し応力  $\sigma_0$  ( $\sigma_B/2$ ) を求めると、

$$\begin{aligned} \sigma_0 &= \frac{\sigma_B}{2} = \frac{K}{2\sqrt{\pi l A}} = \frac{107.7}{2\sqrt{\pi \cdot 4.8} \cdot 0.4844} \\ &= 28.6 \text{ kg/mm}^2 [280 \text{ MPa}] \dots\dots\dots (3) \end{aligned}$$

が得られる。次に繰り返し数を推定する。(2)式から、

$$\begin{aligned} dN &= \frac{dl}{C(\Delta K)^m} \\ \therefore N &= \int_{b_i}^{b_0} \frac{dl}{C(\Delta K)^m} = \int_{b_i}^{b_0} \frac{dl}{C(\sigma_B \cdot A)^m \pi^{m/2} [m/2]} \\ &= \frac{1}{C(\sigma_B \cdot A)^m \pi^{m/2}} \cdot \frac{1}{m/2 - 1} \left[ \frac{1}{b_i^{m/2 - 1}} - \frac{1}{b_0^{m/2 - 1}} \right] \\ &= \frac{1}{1.0 \times 10^{-10} (57.2 \cdot 0.4844)^3 \pi^{3/2}} \\ &\quad \cdot \frac{1}{0.5} \left[ \frac{1}{0.5^{1/2}} - \frac{1}{4.8^{1/2}} \right] \\ &= 16.2 \times 10^4 \dots\dots\dots (4) \end{aligned}$$

ここで、 $b_i$  は想定した初期欠陥の深さである。初期欠陥としては、破面がかなり腐食しているなどから、0.5 mm 程度としても妥当と思われるが、もともと材料にはそのような欠陥は存在しないと考えられるので、(4)式で得られた値を2倍して<sup>5)</sup>、 $32.4 \times 10^4$  回と推定できる。

4.3 実管片振り曲げ疲労試験

前項で求めた推定値をもとに、実管片振り曲げ疲労試験を行った。Fig. 4 に実管片振り曲げ疲労試験におけるパイプ各部位の応力状態を示す。パイプ外表面からの押付荷重、20~40 kN では、パイプの内表面で最大、300~500 MPa 程度の引張応力が加わるが、押付部近傍のパイプ外表面では圧縮応力状態になることがわかる。したがって、このような応力状態では、き裂はパイプの内表面から発生し伝播しうるが、圧縮応力状態の外表面からのき裂の発生および伝播は起こりにくく、水洩発生部の

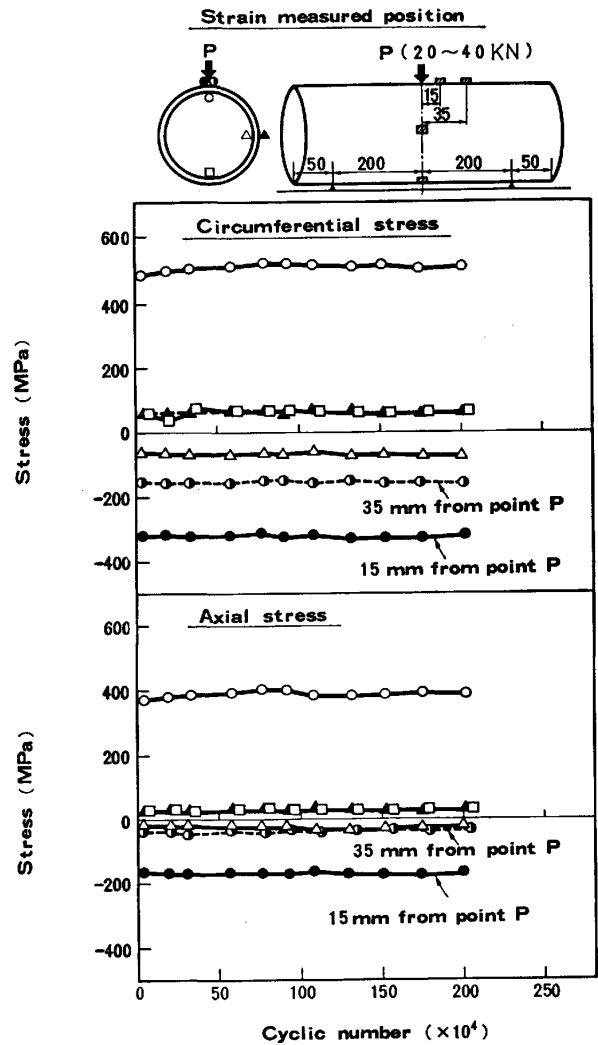


Fig. 4. Measured stress values of pulsating bending fatigue test of pipe.

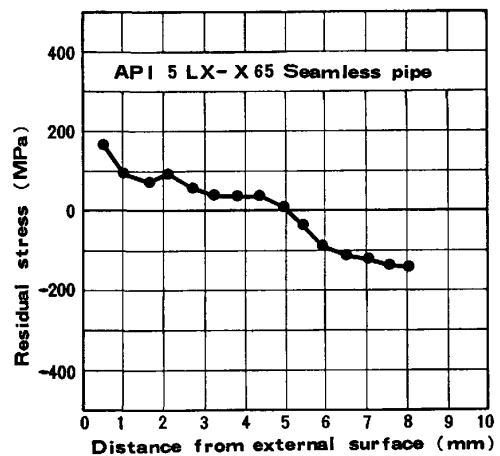


Fig. 5. Residual stress of Q & T pipe.

損傷状態とに矛盾が生ずる。では、なぜ圧縮状態であるパイプ外表面からも、き裂の発生および伝播が起こったかであるが、その要因のひとつに、パイプの残留応力の

Pipe external surface



Pipe internal surface

Photo. 8. Macro fracture surface of pulsating bending fatigue test of pipe.

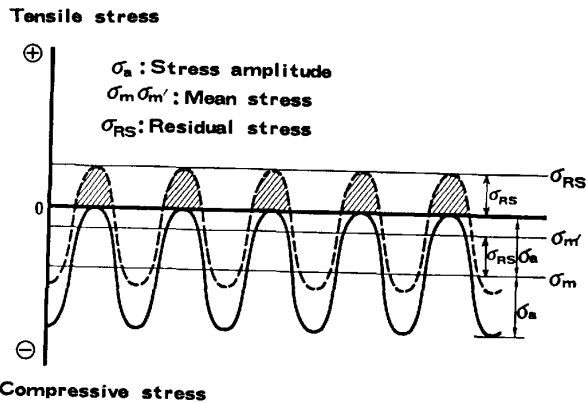


Fig. 6. Effect of residual stress for mean stress.

影響が考えられる。すなわち、パイプの外表面に引張残留応力が存在していたことによつて、圧縮の部分片振りであつたパイプ外表面が、引張応力を含む部分両振りとなることが考えられる。Fig. 5 に水洩発生材と同一鋼種についての、パイプ周方向の残留応力測定結果を示す。同図から、パイプの外表面には、100~200 MPa の引張残留応力が存在することがわかる。このような状態で、パイプ外表面から押付荷重が繰り返し加わつた場合のパイプ外表面の応力状態を Fig. 6 に示す。パイプの外表面は、引張残留応力の存在により、引張応力を含む部分両振りとなることが理解できる。Photo. 8 に実管片振り曲げ疲労試験後のマクロ破面を示す。き裂は、押付荷重側であるパイプ外表面およびパイプ内表面の両方から発生し、伝播しており、水洩発生部の損傷部観察結

果と同様であることがわかる。

以上、水洩発生材に認められた損傷状況および室内実験の結果から、今回のパイプ損傷の原因は、船輸送中に発生した疲労破壊であることを明らかにした。

## 5. 結 言

北米アラスカへ船輸送されたラインパイプの損傷事故材の解析結果および室内実験結果から、たとえ健全なパイプであつても、その輸送中に集中的な荷重が繰り返し加わるような状態に保持されると、パイプの損傷、破壊が起こることがわかつた。また、今回の検討では触れなかつたが、海上輸送の場合には、海水等による腐食作用も影響すると思われ、これらをも含めた諸対策を講ずる必要があると考えられる。

破壊力学的検討において、九大工学部村上教宜教授より資料の御提示をいただいた。ここに記して、厚くお礼申し上げます。

## 文 献

- 1) I. S. RAJU and J. C. NEWMAN Jr.: Eng. Fracture. Mech., 11 (1979), p. 817
- 2) 石田 誠, 野口 博司: 日本機械学会論文集 (A 編), 48 (1982), p. 607
- 3) 浦島親行, 西田新一, 榎本弘毅: 材料学会疲労部門委員会資料, No. 3 (昭和 56 年 6 月)
- 4) F. W. SMITH, A. F. EMERY and A. S. KOBAYASHI: J. Appl. Mechs. (1967) December, p. 953
- 5) 西谷弘信, 西田新一: 機械学会第 46 期全国大会講演会 (1968) 198, p. 83