高圧配管要素の内圧疲労強度に関する研究*

広江 哲幸**, 須藤 勝蔵**, 森本文男**

Tetsuyuki HIROE, Katsuzo SUDO Humio MORIMOTO

Key Words: Fatigue, Piping Components for High Pressure, Thick-Walled Tees, Fatigue Crack Propagation, Corner Crack, Fatigue Life Evaluation, Three Dimensional FEM

1. ま え が き

高圧化学プラントにおける高圧配管には、装置の発停あるいは運転中の圧力媒体の脈動などによって高い繰返し内圧が作用するため、安全性の面から信頼性の高い内圧疲労設計法の確立が要求されている。しかし 100~500 MPa の高圧域における内圧疲労データはまだ少なく、しかも配管要素の中で疲労データとして得られているのは大部分直管(円筒)を対象にしたものの^{(1)~(3)}であるため T 字管、ベンド管、レデューサなど代表的な継手要素の強度設計は直管のデータをベースに経験的に行われる場合が多い。特に厚肉の T 字管は形状の複雑さから応力分布の把握が困難なこともあって強度評価は最も難しいとされている。高圧の厚肉配管では応力の多軸性ととも肉厚方向に大きな応力こう配が存在するため、疲労寿命の推定においては疲労き裂の発生とその後の進展とを考慮することが重要と考えられるが詳細な研究資料は見当たらない。また高圧管ではきず内面に作用する高圧力媒体の効果により内面欠陥の切欠き感度が高く、微細きずからの疲労き裂の進展寿命で管の寿命が決定されることも多い。したがって疲労き裂の進展挙動の解析が特に重要

であり、また高圧配管の保守点検時の管理資料として、残存寿命推定のための有力な手段にもなる。

本研究は高圧配管の内圧疲労強度に関する設計資料を得ることを目的として実験的、理論的検討を試みたものであり、ここでは T 字管、直管、ベンド管を対象とした内圧疲労試験結果および内表面欠陥の強度評価を含む各配管要素の疲労寿命推定の検討結果について報告する。

2. 実 験 方 法

2.1 供試材とその疲労強度 供試材は高圧管材料として広く用いられている AISI 4340 鋼と CrMoV 鋼の 2 種類である。4340 鋼は、供試管の強度評価に異方性が入らないように素材はすえ込み鍛造により正方形板に成形させたものを使用し、これから各試験片、供試管を機械加工により製作した。一方、CrMoV 鋼は調質後の高圧管(引き抜き管)から試験片、供試管を採取した。各々の化学組成、機械的性質を表 1, 2 に示す。これから CrMoV 鋼の場合は管の軸方向、周方向で延性に大きな異方性があることがわかる。

次に供試管の内圧疲労強度評価に必要な供試材の基礎強度試験として低サイクル疲労試験と疲労き裂の進

表 1 供試材の化学組成 (%)

材 料	C	Si	Mn	P	S	Ni	Cr	Mo	V
AISI 4340 鋼	0.38	0.20	0.66	0.010	0.017	1.70	0.84	0.20	—
CrMoV 鋼	0.30	0.27	0.55	0.018	0.009	—	2.54	0.17	0.17

表 2 供試材の機械的性質

材 料	0.2% 耐力 MPa	引張強さ MPa	伸び %	絞り %	シャルピー値 ¹⁾ N·m
AISI 4340 鋼	933	1023	20.7	54.6	83
CrMoV 鋼(軸方向)	751	845	25.8	71.5	142
CrMoV 鋼(周方向)	770	868	20.1	52.5	58

¹⁾ 2 mmV ノッチ, 20°C

* 昭和 54 年 4 月 4 日 第 56 期通常総会講演会および昭和 55 年 4 月 1 日 第 57 期通常総会講演会において講演, 原稿受付 昭和 55 年 12 月 10 日.

** 正員, 三菱重工業会社広島研究所 (〒733 広島市西区観音新町 4-6-22).

*** 菱技研会社 (〒733 広島市西区観音新町 2-4-25).

展試験を実施した。図1に低サイクル疲労試験の結果を示す。試験片は砂時計形試験片(600番エメリー紙仕上げ)を用い、CrMoV鋼については供試管の周方向からも試験片採取した。試験は径制御の片振り引張り条件(ひずみ比:0.05)で実施し、4340鋼については破断寿命 N_f のほかに検出き裂長さ0.1~0.4mmの疲労き裂発生寿命 N_c を計測した。図2に疲労き裂の進展試験結果を示す。試験片は大部分CT形試験片を用いたが、CrMoV鋼円筒の半径方向のき裂進展試験についてはC形試験片を用いコンプライアンス法⁽⁴⁾によって応力拡大係数を求めた。本試験の結果は疲労き裂進展速度 da/dN (mm/cycle)と応力拡大係数範囲 ΔK (MPa $\sqrt{m}$)の関係として応力比 R の効果を含め次式のように表示できる。

$$da/dN = \bar{c} \Delta K^m \dots\dots\dots (1)$$

ここで 4340 鋼の場合

$$m = 2.56$$

図1 供試材の低サイクル疲労強度

$$\bar{c} = 1.62 \times 10^{-8} = c_1 : R = 0.05$$

$$\bar{c} = 2.58 \times 10^{-8} = c_2 : R = 0.75$$

CrMoV 鋼(軸方向, 半径方向)の場合

$$m = 2.39$$

$$\bar{c} = 2.63 \times 10^{-8} = c_1 : R = 0.04 \sim 0.87$$

2.2 供試管の形状寸法 内圧疲労試験に用いた13種類の供試配管要素の形状寸法を図3に示す。4340鋼では補強付きT字管(RS)を主要研究対象とし、

図2 供試材の疲労き裂進展速度

図3 供試配管要素の寸法形状

比較のため無補強の T 字管 (UR), 直管 (CL) および 45° ベンド管 (BD) を製作した。更に補強付き T 字管については内面の軸方向に放電加工によってスリットを加工したもの (RN1, RN2, RN3) や, 内面にドリル食い込みなどによる微細な加工きずのあるもの (RF) そしてコーナ部を面取りしたもの (RC) を供試体とした。また 薄肉の直管 (TC, TCN) を除き, 内外径比はいずれも 2.0 である。ただし直管を熱間曲げたベンド管については焼入れ焼もどし後の内面仕上げを行っていないため, 厚さ $0.1 \sim 0.2 \text{ mm}$ の脱炭層があり, またわずかながら偏肉 (偏肉率: 0.17), 肉減りがあった。

一方, CrMoV 鋼の場合, 実際の高圧管から図に示すような平滑の円筒 (CLS) と軸方向スリット付きの切欠き円筒 (CLN) の 2 種類の供試円筒を採取製作した。またこれら供試管の内表面は RF タイプ T 字管とベンド管を除き粗さ 3.2 s に仕上げた。

2.3 内圧疲労試験装置と試験条件 本研究用に製作した高圧配管用内圧疲労試験装置はひまし油を圧力媒体とし, ピストン・シリンダ方式によって高圧を発生させるもので, ピストンは油圧サーボのアクチュエータに連結し, 圧力計または供試管にはりつけたひずみゲージにより圧力制御した。一方, CrMoV 鋼円筒については別途製作した両端開放形の円筒用高圧負荷バグをアクチュエータに取付け試験した。内圧の繰返し速度は $0.1 \sim 0.5 \text{ Hz}$, 圧力比 ($=P_{\min}/P_{\max}$) は主に $0.0 \sim 0.05$ の片振り条件で疲労試験したが一部, $0.5 \sim 0.7$ の高平均圧の試験も実施した。また, RS, RN1, RF タイプの一部の供試管については自緊処理の疲労寿命に与える効果をチェックするために内圧 490.4 MPa (直管部の塑性貫通率, 約 0.25 に相当する) の初期過負荷後, 疲労試験に供した。内圧疲労試験では最終破損 (漏えい) 寿命の計測のほかに, RS, RN1, RN3 および CLN の各タイプの一部の供試管については, 試験の途中で何回か管を取り外し, 管内検査器 (倍率: $2.2 \sim 17.5$) を用いてコーナ部, 切欠き部からのき裂の発生, 成長を計測した。また CLN タイプの一部の供試円筒については破面にビーチマークを付ける目的で試験の途中, 数回程度圧力範囲を減少させることも試みた。

3. 応力解析

補強付き T 字管 (RS) の応力解析として三次元有限要素法 (プログラム: ASKA) による解析を実施し, 更に解析精度の評価のために応力凍結法による光弾性試験も試みた。図 4 (a) は有限要素法解析のメッシュ

分割 (438 節点, 38 要素) と解析によって得られたコーナ部断面 (き裂成長面) に垂直な応力の等応力線図を示している。この応力分布はやや枝管側のほうが大きな値を示しているがほぼ図中 $p-p'$ 軸に対称である。図 4 (b) は光弾性試験と有限要素法解析とによる T 字管内外面の応力分布を示している。両者の解はよく一致しており, コーナ部内面エッジの最大応力点 P の応力集中係数は光弾性試験では 1.89, 有限要素法解析では 2.0 であった (以後の強度評価には有限要素法解析結果を用いる)。

一方, 無補強の T 字管 (UR) については西田らの文献 (5) データから外挿推定すると応力集中は 4.3 となるから補強効果の大きいことがわかる。またコーナ部の面取りによる応力集中の低減率についても文献

(a) 三次元有限要素法解析結果

- : Circumferential stress ratio σ_θ/σ_n by photoelastic test
- : Axial stress ratio σ_z/σ_n by photoelastic test
- △: Circumferential stress ratio σ_θ/σ_n by FEM
- ▲: Axial stress ratio σ_z/σ_n by FEM
- (σ_n : Circumferential stress at inner surface of cylinder)

(b) 有限要素法と光弾性試験結果の比較

図 4 T 字管の応力解析 (有限要素法と光弾性試験)

(5) から推定すると本試験の T 字管 (RC) の面取り量 $0.55 \sim 0.25 \text{ mm}$ に対しては低減率 $10 \sim 4\%$ と推定され、面取りによる寿命向上の効果は少ないことが予想される。CLS, CLN 円筒は比較的軸長が短い円筒中央部ではほぼ Lamé の式で応力評価できることを実験により確認した。

4. 内圧疲労試験結果とその検討

4.1 配管要素の疲労損傷と強度比較 本研究での供試管の疲労損傷の形態は試験条件にかかわらず、すべて、管内表面の切欠き欠陥または最大応力点 (T 字

管コーナ部) で発生した疲労き裂が外表面まで最大主応力に垂直な方向に安定成長して漏えいに至る状況を示した。一方、特定のき裂発生箇所が限定されない平滑円筒については内面から多数の疲労き裂が発生していた。図 5 に代表的な疲労破面の写真を示す。図 5 (b) はコーナ部に切欠き加工した T 字管の破面を示すが切欠き加工しない反対側のコーナ部にも 0.45 mm 深さの疲労き裂が観察された。この場合、切欠き加工したコーナ部からの漏えいまでのき裂進展寿命と切欠き加工しないコーナ部でのき裂発生寿命とがほぼ同等であることがわかる。図 5 (e) は T 字管直管部の内表面加工しずを起点として疲労き裂が発生し、漏えいに至った疲労破面を示しており、欠陥の深さは約 $30 \mu\text{m}$ である。このような微細表面欠陥は熱処理後の内面の仕上げ加工をしていないベンド管の場合も問題とな

$\Delta P = 392.3 \text{ MPa}$, $N_f = 29\,033 \text{ cycle}$

(a) RS タイプ T 字管

$\Delta P = 318.7 \text{ MPa}$, ($R = 0.05$), $N_f = 20\,782 \text{ cycle}$

(b) RN 1 タイプ T 字管

$\Delta P = 294.2 \text{ MPa}$, $N_f = 18\,259 \text{ cycle}$

(c) UR タイプ T 字管

$\Delta P = 318.7 \text{ MPa}$, $N_f = 46\,764 \text{ cycle}$

(d) RF タイプ T 字管

$\Delta P = 392.3 \text{ MPa}$, $N_f = 31\,027 \text{ cycle}$

(e) RF タイプ T 字管 (直管部の微小欠陥からの破面)

$\Delta P = 338.3 \text{ MPa}$, $N_f = 17\,444 \text{ cycle}$

(f) CLN タイプ直管

$\Delta P = 272.1 \text{ MPa}$, $N_f = 27\,600 \text{ cycle}$

(g) CLS タイプ直管

図 5 代表的な内圧疲労破面例

り、すべての貫通疲労破面の起点付近に、0.04~0.05 mm 深さの表面欠陥が観察された。図5(g)は平滑円筒の代表的破面を示しており、漏えいに至る成長途中でき裂の干涉、合体がみられる。

人工切欠き付き供試管を除いた5種類の配管要素(内外径比: 2.0, 4340 鋼)の内圧疲労試験結果(漏えい寿命)を図6に示す。図中の破線は疲労き裂の発生寿命推定結果を示し、各配管要素のトレスカ則による最大相当弾性応力を材料の疲労き裂発生寿命データ(図1)と対応させ、簡易的に推定した。その結果、T字管では補強効果による寿命向上が、一方(D)と(B)、(E)の曲線比較から直管部およびベンド管では内面の微細欠陥による著しい寿命低下が認められる。特に、T字管コーナ部は低サイクル域で疲労き裂発生後の進展寿命が全寿命の大部分を占めることになるため、直管(ベンド管)の欠陥部同様疲労き裂の

進展解析が寿命評価のポイントとなることがわかる。自緊処理した試験片(*印)は、無処理の試験片と同等もしくはやや寿命向上の効果が認められる。一方コーナのわずかな面取り(⊖印)は疲労強度にほとんど影響を与えていない。

また、図中の漏えい寿命曲線(実線)の内、(A)・Lは内圧疲労試験結果をベースにしているが、(B)・L、(E)・Lは初期き裂 $a_i=0.05$ mm のき裂進展寿命計算結果を、(C)・L、(D)・Lはき裂の発生と進展を考慮した寿命計算結果をベースに各々設定したものである(後出の図9, 10の説明参照)。

4.2 疲労き裂進展の近似解析 T字管のコーナき裂と直管の内表面き裂の進展解析を検討するために、まずき裂の成長に伴うき裂形状を計測した結果を図7(a)に示す。コーナき裂については補強付きT字管コーナ部で発生したすべての疲労き裂の試験終了時

の破面形状を計測し、コーナエッジP点からのき裂深さ a と内表面のき裂長さ l_1, l_2 で整理した。図7(b)に示すように、コーナき裂をP点中心の仮想だ円き裂の一部とみなすと、き裂の形状はほぼ次式の関係を満足してき裂が成長していると考えられる。

$$a/2c=0.4 \quad (\text{または } a/l=0.9) \quad \dots\dots\dots (2)$$

ここで、

$2c$: だ円の長径

l : 仮想部分だ円き裂の表面長さ

一方、直管の内表面き裂については初期切欠きの深さの異なる3種類の円筒(CLN)の疲労破面上のビーチマークを

図6 配管要素の疲労強度比較

(a) き裂形状の計測結果

(b) き裂のモデル化

図7 疲労き裂の形状計測結果(T字管のコーナき裂と円筒の内表面き裂)

計測してき裂深さ a と内表面のき裂半長 c で整理した結果を示しており、コーナき裂と同様式 (2) の関係で表される形状に漸近しながら進展していることがわかる。

$a=0.5$, 5 mm からの破線は式 (2) と異なる形状の初期切欠きから発生した疲労き裂が式 (2) の形状比率に漸近しながら成長することを示す。

このようなき裂形状の観察結果をもとに、本研究では高圧管内表面き裂の応力拡大係数は、き裂の最深部のみの進展に着目し、平板の表面き裂の近似計算式を補正して導出した。直管の内表面き裂の近似的応力拡大係数範囲 ΔK を次式⁽²⁾に示す。

$$\Delta K = M_s (\Delta \sigma_{\theta\theta} + \Delta P) (\pi a / Q)^{1/2} f(a/t_0) \dots (3)$$

ここで、

$$M_s: \text{表面効果係数} = 1 + 0.12(1 - a/2c)^2$$

$$\Delta \sigma_{\theta\theta}: \text{最深部の周方向応力} = \Delta P \{ r_i^2 / (r_0^2 - r_i^2) \} \{ (r_0/r)^2 + 1 \}, r = r_i + a, t_0 = r_0 - r_i \quad (r_i, r_0: \text{直管の内外半径})$$

ΔP : 繰返し圧力範囲

Q : き裂形状の補正係数

$$f(a/t_0): \text{有限厚補正係数}^{(6)} = \{ (2t_0/\pi a) \tan(\pi a/2t_0) \}^{1/2}$$

次に T 字管のコーナき裂については、式 (3) と同様に平板の近似式をベースに、コーナの表面効果、内面曲率の補正などを考慮した係数補正を行い次の近似式を設定した。

$$\Delta K = \bar{\alpha} M_s^2 (\Delta \sigma_{\theta\theta} + \Delta P) (\pi a / Q)^{1/2} f(a/t) \dots (4)$$

ここで、

$\bar{\alpha}$: コーナの表面効果係数⁽⁷⁾

$$= \alpha_f(0^\circ) \alpha_f(90^\circ) = 1.26$$

$\alpha_f(\theta)$: 半円き裂の表面効果係数⁽⁸⁾

M_s : 内面曲率の補正係数⁽⁹⁾ (a の関数)

$$\Delta \sigma_{\theta\theta}: \text{図 4 (a) の P-P' 上のき裂面垂直応力} = \Delta P \{ A_0 + A_1(a/t) + A_2(a/t)^2 + A_3(a/t)^3 + A_4(a/t)^4 + A_5(a/t)^5 \}, A_0 = 3.390, A_1 = -12.967, A_2 = 29.263, A_3 = -34.516, A_4 = 17.770, A_5 = -2.385$$

式 (3), (4) においては最深部の周方向応力及びき裂内面に作用する圧力を考慮したが、き裂進展による応力の再分布は無視した。

この式 (4) または式 (3) を式 (1) に代入、数値積分によって T 字管コーナき裂と直管内表面き裂の進展解析を実施した。図 8 は T 字管のコーナき裂と直管の内表面き裂について、き裂深さ a と漏えいまでの残存寿命 N_R との関係についての解析結果と計測結果との比較を示す。図の横軸は基準圧力 ΔP_0 での残存寿命を基準に作成しており、式 (1) の形から、任意の繰返し圧力範囲 ΔP での N_R は図の横軸の数値に $(\Delta P_0/\Delta P) \times 10^4$ を乗ずることにより得られる。

ここでき裂深さ a の計測値は図中の表面き裂長さ l , l' を計測した後 $a/l=0.9$, $a/l'=0.4$ の関係を用いて換算した。解析では初期欠陥 (切欠き) の形状に関係なく式 (2) の関係を用いるなどの簡略化を行っているが、圧力比 0.0~0.05 での内圧疲労試験のき裂計測データは応力比 0.04~0.05 での材料のき裂進展速度データを用いたき裂進展解析結果に近い値を示しており、これから式 (3), (4) の近似式は通常の片振り圧力負荷条件下で十分実用性があると考えられる。一方、圧力比 0.7 の高平均圧の試験では、き裂がコーナき裂の場合、解析値の 2 倍、直管内表面き裂の場合、4 倍の速度で進展しており、これはき裂の開口に伴って高圧力媒体がき裂先端部の疲労挙動に作用し、き裂成長を加速すると考えられるが、今後更に詰める必要がある。

4.3 配管要素の内圧疲労強度と寿命推定の検討

4340 鋼の T 字管、直管および CrMoV 鋼円筒の各々の配管要素について内圧疲労試験結果を整理し、通常の疲労き裂発生寿命推定及び欠陥部の強度評価を中心とした疲労き裂の進展寿命推定について検討する。

図 9 はコーナ部を疲労き裂の起点として漏えいした補強付き T 字管の内圧疲労試験結果と疲労寿命の推定線図を示す。図中、破線は T 字管コーナ部での最大相当応力を図 1 の材料のひずみ制御疲労データと対応

(a) コーナき裂 (AISI 4340)

(b) 円筒の内表面き裂 (CrMoV)

図 8 疲労き裂の進展解析と計測結果 (き裂深さと残存寿命の関係)

させて得た疲労き裂発生寿命 N_0 の推定結果を示し、内圧疲労試験でのコーナ部（切欠き、面取りなし）における最初のき裂検出寿命（×, ⊗, ⊠印）に近い安全側の値となっている。

一方、疲労き裂の漏えいまでの進展寿命 N_p は初期き裂深さ a_i をパラメータとして解析され、その結果を図中一点鎖線（ $R=0.005$ ）、二点鎖線（ $R=0.70$ ：加速効果を考慮）で示す。これらは切欠き深のさが a_i

と対応するコーナ部切欠きを有する T 字管の漏えい寿命とほぼ一致しており、これから N_p 線図が欠陥部の寿命評価に適用できることがわかる。この N_0 と N_p ($a_i=0.01\sim 1.0$ mm) の線図は $\Delta P=260\sim 270$ MPa 付近で交差しており、これ以上の繰返し内圧ではき裂進展寿命 N_p が支配的になり、以下では逆にき裂発生寿命 N_0 が支配的になることがわかる。したがって応力集中部の疲労き裂発生に基づく通常の疲労設計は高圧力側では安全側になるが、低圧力側では特に欠陥の評価に注意する必要がある。またコーナに欠陥や切欠きのない T 字管の漏えい寿命試験データ（○印）は N_0+N_p ($\bar{a}_i=0.01$ mm) の線図 N_f と一致しており、これから仮想的初期き裂 $\bar{a}_i$ を設定することにより疲労き裂の発生、伝ばを考慮した漏えい寿命の推定が可能となり、高圧配管の保守点検の管理資料として有用と考えられる。なお、図中、 $\Delta K_i \leq \Delta K_{th}$ は、初期応力拡大係数範囲 ΔK_i が疲労き裂進展の下限界応力拡大係数範囲 ΔK_{th} (4.65 MPa $\sqrt{\text{mm}}$ と仮定) より低い範囲、つまり破壊力学的に疲労き裂の進展が起これないと考えられる領域を参考のため示したものである（図 10 も同様）。

図 10 は 4340 鋼直管の内圧疲労試験結果と疲労寿命の推定線図を示す。寿命推定法は T 字管の場合と同じであるが直管の場合、本試験の圧力範囲ではき裂発生寿命 N_0 が支配的であり、またき裂進展寿命 N_p は微細な初期き裂寸法によって著しく相違があるのが特徴である。切欠きまたは欠陥を起点とする漏えい寿命の試験データ（ベンド管を含む）は切欠き、欠陥の深さを初期き裂寸法とするき裂進展寿命推定線 N_p とほぼ一致している。また平滑円筒の漏えい寿命データはき裂の発生寿命推定線 N_0 に近く、仮想初期き裂 $\bar{a}_i$ は 0.5 mm とし進展寿命 N_p を求めた。これらの特徴は 2 種の内外径比の直管で同じであり、直管部の疲労設計は主として欠陥強度に重

図 9 T 字管（コーナ部破損）の内圧疲労試験結果と寿命推定

図 10 直管の内圧疲労試験結果と寿命推定 (4340 鋼)

図 11 直管の内圧疲労試験結果と寿命推定 (CrMoV 鋼)

点をおいて行う必要がある。

図 11 は CrMoV 鋼円筒 (平滑, 切欠き付き) についての内圧疲労試験結果と寿命推定検討結果を示す。この円筒 (内外径比: 1.55, 1.86) は両端開放形であるがトレスカ則による応力評価では中間主応力の影響は無視できるのでこれまでと同様な強度評価を実施した。その結果材料の疲労強度の異方性が大きい円筒の場合, 最弱の周方向疲労データ (この場合材料の N_f のデータが無いので N_f のデータを使用) を用いれば, ほぼ同じ寿命評価ができると考えられる。

5. あとがき

4340 鋼と CrMoV 鋼で製作された高圧厚肉配管要素 (T 字管, 直管, ベンド管) について内圧疲労試験を実施し, き裂の進展挙動解析を中心とした強度検討を行い, 次の結果を得た。

(1) T 字管のコーナき裂および直管の内表面き裂について近似的なき裂進展解析を行い, 実験によりその実用性を確認した。また高平均圧下の進展には加速効果が認められた。

(2) 配管要素の内圧疲労強度比較では, T 字管は補強効果により寿命向上が認められたが, 直管 (ベ

ンド管) では内面の微細欠陥により著しく寿命低下し, その寿命はき裂の進展解析によって評価できた。

(3) T 字管の漏えい寿命は, 通常の疲労き裂発生寿命と仮想初期き裂を考慮したき裂進展寿命の和として求められ, 寿命予測ができた。一方, 直管はき裂発生寿命が支配的であり, 引き抜き管のように材料強度に異方性がある場合は最弱方向の強度で評価する必要がある。

最後に本研究の内圧疲労試験, 光弾性試験に協力いただいた当社, 尾崎忠男氏, 鳩山正義氏に謝意を表します。

文 献

- (1) Morrisson, J.L.M., ほか 2 名, *Proc. Inst. Mech. Eng.*, 174 (1960), 95.
- (2) 西岡・ほか 2 名, 圧力技術, 12-3 (昭 49), 128.
- (3) 山口・ほか 2 名, 機論, 42-353 (昭 51), 8.
- (4) Kendall, D.P. and Hussain, A.M., *Exp. Mech.*, 12-4 (1972), 184.
- (5) 西田・ほか 2 名, 応力と歪, 2-1 (昭 48), 22.
- (6) Paris, P.C. and Sih, G.C., *ASTM Spec. Tech. Publ.*, 381 (1964), 30.
- (7) Liu, A.F., *Eng. Fract. Mech.*, 4-1 (1972), 175.
- (8) Smith, F.W., ほか 2 名, *Trans. ASME, Ser. E*, 34-4 (1967), 953.
- (9) Kobayashi, A.S., ほか 3 名, *Proc. 3rd Inst. Conf. Pressure Vessel Technol.*, Pt. II (1977), 507.

討

論

〔質問〕 平川 賢 爾

(住友金属工業会社中央技術研究所)

(1) 通常超高圧管の内面はホーニング加工などにより, 表面欠陥の深さは貴論文より小さいものと考ええるが, このような欠陥材を用いてテストされた理由は何か。

(2) 高圧管の疲労設計は疲労限度設計 (許容応力を疲労限度以下になる) が基本と考える。この立場からは, 欠陥がある場合の K_{th} と応力拡大係数の評価が重要と思う。ご意見を伺いたい。

〔回答〕 (1) 高圧配管要素の内面にはその製造過程で生じたきず, または長時間運転中に内面材質が経年老化して生じたきずなどを起点として疲労き裂が進展し漏えいしたりぜい性破壊が生じたという高圧設備の事故例が報告されている (付 1)。特に高圧配管要素の寿命が疲労き裂の進展寿命で決定されることが多く, また高圧配管要素の保守点検時における残存寿命推定資料を得るために, 内面欠陥の疲労き裂の進展挙

動解析が重要と考え人工切欠き付き供試管を用いて内圧疲労き裂の進展特性を求めた。

(2) 高圧配管要素が耐用期間中に受ける内圧の繰返し数が 10^5 回以下である場合が多く, このような場合疲労き裂の発生および進展を考慮した疲労設計が必要になる。また供試 T 字管の場合には内面コーナ部の応力集中係数は 2.0 となり平滑円筒部より応力が厳しく有限寿命範囲の疲労強度を推定する場合が多いことから, 疲労き裂の進展挙動解析を主体に強度検討を行った。疲労限度設計の参考として図 9 および図 10 に破壊力学的に疲労き裂の進展が起こらないと考えられる領域 $\Delta K_i \leq \Delta K_{th}$ を示しているが, 今後さらに実験を重ね, データの集積を行いたいと考えている。

〔質問〕 河 合 末 男 (日立製作所機械研究所)

(1) 試験片によるき裂発生寿命はき裂長さ 0.1~0.4 mm のときの繰返し数をとっている。一方, 図 9 の, 例えば RS の最初のき裂検出時のき裂長さは 1.2~3.5 mm であり, 上記のものの約 10 倍である。従って, T 字管のき裂発生寿命が小形試験片の結果を用いて推定したもの (図 9 の破線) とどの程度一致す

(付 1) 井上, 高圧力, 9-5 (昭 46), 15.

るのか明確でないように思われる。例えば、T字管で得られた結果を用いて0.1~0.4 mmのき裂長さのときの寿命を計算で求めると破線とどの程度一致するかお教えいただきたい。

(2) 図4の応力解析結果は $P=98.1$ MPaのときの値であるが、疲労試験は最大約 $P=500$ MPaまで行っている。図4の応力値から判断すると、疲労試験時には大部分の試験片のかなりの領域が材料の耐力を越えることになり、応力の再分布が起こっていると考えられる。このような条件に対して、式(3)、(4)で K が正しく計算できるか。また、 K が正しく計算できると仮定して、寿命評価に線形破壊力学を適用してよいか。

〔回答〕 (1) T字管の内面コーナ部のき裂深さ a は管内検査器を用い主管側内表面き裂長さ l を計測し図7により換算した値である。き裂発生寿命を詳細に検討するためには測定データが十分とは言えないが、参考のためT字管RSの図9に示す最初のき裂検出寿命および図8(a)のき裂進展計算値よりき裂長さ0.4 mmのときの寿命を求めれば試験圧力範囲 $\Delta P=490.4, 392.3, 279.5$ (MN/m²)に対してそれぞれ $1.5 \times 10^3, 7.4 \times 10^3, 5.8 \times 10^4$ (回)となり、き裂検出精度およびき裂進展データのばらつきなどを

考慮すれば図9のき裂発生寿命 N_0 (破線)の値 $2.9 \times 10^3, 6.5 \times 10^3, 3.5 \times 10^4$ (回)とほぼ対応すると考える。

(2) 加工硬化を無視した平滑円筒の全断面降伏圧の計算値 P_Y は4340鋼直管(内外径比2.0)の場合746.8 MPa, CrMoV鋼円筒(内外径比1.86)の場合538.2 MPaで、T字管RSおよびRNは補強効果によりさらに高い値と考えられる。一方図8において最高試験圧力 $P_{\max}$ は(a)4340鋼T字管の場合490.4 MPa, (b)CrMoV鋼円筒の場合338.3 MPaでいずれも全断面降伏圧にはかなり余裕がある。また図8(a)の圧力比0.05の場合、試験圧力範囲 $\Delta P=490.4$ (図中の記号 Δ), 392.3($\circ$), 279.5($\square$), 318.0($\diamond$), 220.7(∇), 245.2($\triangledown$)とそれぞれ異なっているが、内圧疲労試験のき裂計測データは応力比0.05での材料のき裂進展速度データを用いたき裂進展解析結果に近い値を示しており、式(3)、(4)の近似式は通常の片振り圧力負荷条件下で十分実用性があると考えられる。また本供試管は実際の高圧化学プラントの小形高圧配管要素の実寸法に近いので実機高圧配管要素の非破壊検査で検出される欠陥寸法と残存寿命との関係の評価するために式(3)、(4)の適用が可能と考える。