

討20 炭素鋼の局部腐食の進行速度と寿命 (腐食事例の統計・確率的評価)

日本鋼管(株)技術研究所 ○本田正春 酒井潤一
松島 巖

1. 緒言

鋼製の配管が使用される場所や環境は非常に多岐にわたっている。これらの配管で腐食が生じた例を調査すると、全面的に腐食する場合と局部的に腐食する場合がある。配管の寿命は、これらの腐食によって管が貫通するまでの期間と考えられるので、局部損傷の解析が重要になるが、腐食形態が示すばらつき(孔食深さ、位置など)のために、正確な損傷の把握と寿命の推定は困難である。本報は、配管の腐食損傷の定量的な把握と寿命の推定を行なうために、確率・統計的な手法で配管の腐食状況調査を行なった例を示す。一つはパイプライン内面にある最大孔食深さの予測および孔食成長速度の推定であり、他は配管が土壤中でマクロセルによる外面腐食によって貫通する場合の寿命(漏洩までの期間)の統計的性質の解明である。

2. 例1;パイプライン内面の最大孔食深さの予測と孔食成長速度の推定

配管の腐食状況を調べる場合、小試験片を採取して調査することが多い。腐食が孔食のような腐食形態を示す場合、孔食の局所性や深さのばらつきなどを考慮すると、小試験片から配管全体における最大孔食深さを推定することは非常に難しい。そこで極値分布⁽¹⁾(最大値の第一漸近分布)を使用して、配管内面の孔食の最大深さを推定した。

2・1 試料

全長6.8Kmのパイプラインの上、中、下流位置(A、B、C)で、長さ約1mづつの試料を切断採取した。試験管の使用期間は3.5~11ケ年である。試験管は管内面の表面積が236cm²になるように細分して、さびなどを除去した後、デプスゲージで孔食深さの測定を行なった。

2・2 実験方法

各試験片(n個)について最も深い孔食を求め、小さい順に並べ順位Mをつけた。累積確率Fと規準化変数Yを(1)、(2)式によって計算し、極値確率紙に孔食深さに対してプロットした。

$$F = M / (n + 1) \quad (1)$$

$$Y = - \ln(-\ln F) \quad (2)$$

孔食深さが極値分布する場合は、(3)式で示す直線の周りにばらつくことが知られている。

$$x = u + Y / \alpha \quad (3)$$

ここでxは孔食深さ、uは特性最大値、αは極値分布の形状係数である。

2・3 結果と考察

2・3・1 配管における最大孔食深さの推定

ラインのA、B、C位置で採取した、11年使用の試験片の孔食深さの極値分布を図1に示す。確率紙にプロットした各点は、(3)式で示される直線に良い一致を示した。極値分布はラインの上流ほど深い側にあり、中下流になると浅い側に移る。極値分

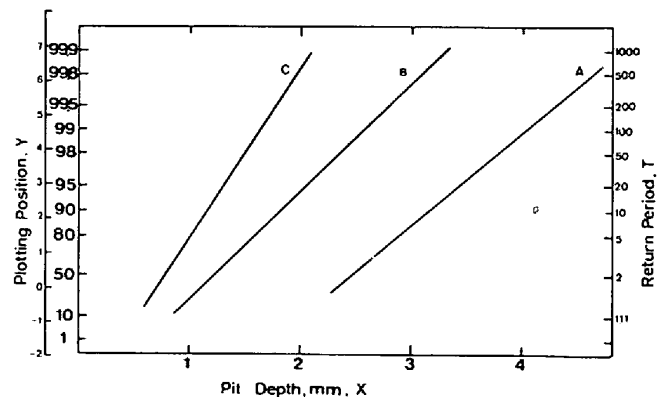


Fig.1 Extreme-value distribution of maximum pit depth and effect of environmental change on the shape factor of distribution.

11 years
Environment A; the upper reaches of the pipe line.
B; the median
C; the lower

布の形状を示す直線の傾きは、下流になるにしたがい立ってくる。これは、パイプ内を流れる水の酸素量が下流ほど少なくなるなどの腐食環境の変化が持たらしめたものであると考えられる。

これらデータから配管に存在しうる最大孔食

深さを予想した。再現期間 T は、ある深さの孔食が出現するのに要する試行回、すなわちパイプ長を示し、 T が 7 以上のとき、(4)式で与えるので、配管 5, 50, 500 m 長さに予想される最大孔食深さを求め表 1 にまとめた。

Table 1. Maximum pit depth estimated extreme-value distribution.

return period location	T=100 5m	T=1,000 50m	T=10,000 500m	equation
A	3.9	4.7	5.5	$X = 2.37 + \ln T / 2.86$
B	2.8	3.5	4.3	$X = 1.23 + \ln T / 3.03$
C	1.8	2.2	2.7	$X = 0.84 + \ln T / 5$

$$x \approx u + (\ln T) / \alpha \quad (4)$$

孔食深さは、配管が長くなるに従い深いものが予想され、ライン長さ 500 m あたり、A 地点で 5.5 mm、B 地点で 4.3 mm、C 地点で 2.7 mm となった。これらの孔食は、236 cm² の試験片に確率 $P (= 1/T; T$ は再現期間) で存在するともいえるので、 T_ω 個の試験片から成るパイプにそれらの孔食が存在する確率 $W(\omega)$ は(5)式で示される。

$$W(\omega) = 1 - (1 - P)^{T_\omega} \quad (5)$$

A 地点でそれぞれの深さの孔食が、 $T_\omega \cdot \omega$ の試験片(あるパイプ長さ)から成る部分に生じる確率 $W(\omega)$ を図 2 に示した。長さ 5 m のパイプで、3.9, 4.7, 5.5 mm 深さの孔食が生じる確率は、0.63, 0.04, 0.002 になることが分かった。

2・3・2 配管の寿命の推定

前節は 11 年経過した配管の最大孔食深さの予測で、配管がこの先どれくらいで貫通するかといった情報は与えない。

しかし孔食深さの極値分布の経年変化を時間の関数で表わせば、貫通までの期間の予測は可能である。

ライン A 地点で、3.5, 9.5, 11 年使用後に採取した試験片の孔食深さの極値分布を図 3 に示す。極値分布は、使用年数と

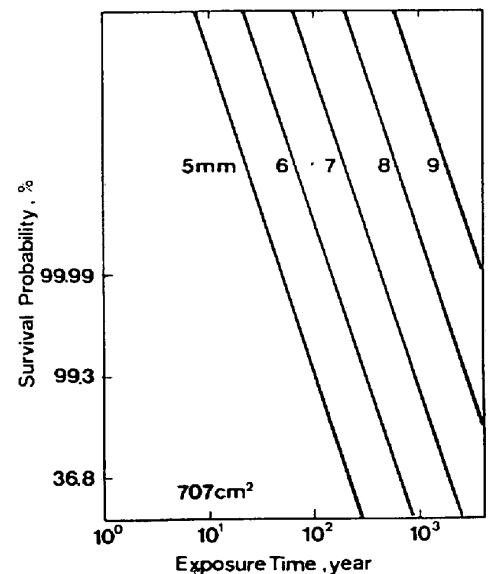


Fig.4 Survival probability of the time to perforate versus exposure time.

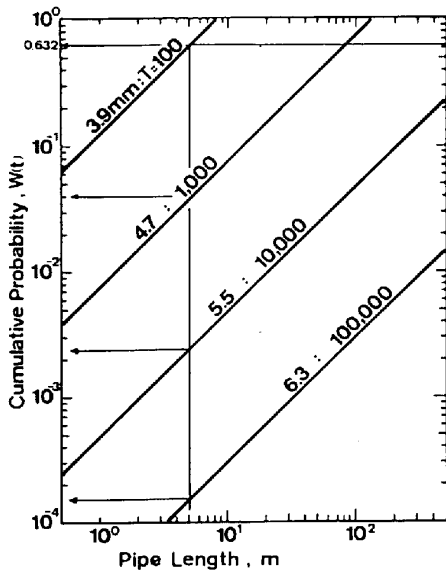


Fig.2 Cumulative probability of pit, 3.9 ~ 6.3 mm, versus pipe length.

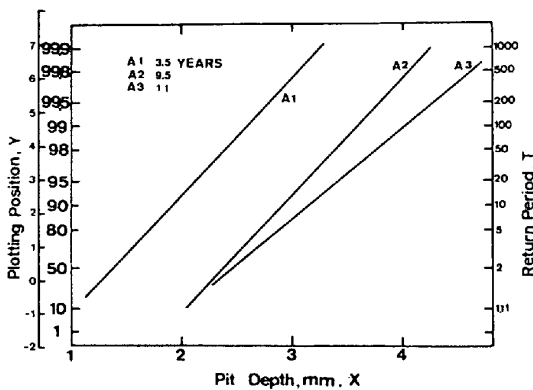


Fig.3 Extreme-value distribution of maximum pit depth in different year of exposure.

3.5, 9.5, 11 years; location A

共に深い側へ移行するが、分布形状を示す直線の傾きはほとんど変わっていない。FINLEYは、極値分布がこのような変化をする場合、特性最大孔食深さ V と時間 t の間に(6)式が成立し、経

年変化に対して配管が貫通しない確率を求めることができることを示している。⁽²⁾

$$V = b \cdot \log t + c \quad (b, c \text{ は一定}) \quad (6)$$

FINLEY が示した方法で、A地点の長さ0.1 mの配管に5～9 mm深さの孔食が存在しない確率を求め図4に示した。その確率は使用期間の増加をともに減少している。配管長さ0.1 mあたりの確率は非常に小さいが、我々が必要とする確率は、0.1 mの管n個から成る配管の場合である。その確率は次のようにして求めた。0.1 m管がn個から成る配管の寿命分布関数 $P(t)$ は、0.1 m管の累積確率 $F(t)$ (1 - (ある深さの孔食が生じない確率))に関係し(7)式が与えられるので、図4より求められる11年目に5 mmの孔食が生じない確率 $2.1 \times 10^{-7} \%$ を用いると、500 mのパイプの $P(t)$ は $1.04 \times 10^{-3} \%$ となった。

$$P(t) = 1 - \{ 1 - F(t) \}^n \quad (7)$$

3. 例2；マクロセル腐食による配管の寿命

土壤中で鋼が腐食する場合、その速度は多くの場合、 0.02 mm/year を超えることはないが、マクロセルを構成すると、配管がごく短期間に貫通することがある。マクロセル腐食が生じた時、その配管の公称肉厚を漏洩までの期間で除した平均腐食速度は $0.5 \sim 2 \text{ mm/year}$ の範囲にばらつくものが多い。⁽³⁾

本章では、配管が建屋基礎鉄筋などと接触してマクロセルを構成した事例を集め、漏洩までの時間を統計的に整理し、マクロセル腐食による配管の平均貫通期間および腐食速度などを定量的に求めた。

3.1 試料

供試材は15, 20, 40, 50 A(公称肉厚は各々2.8, 2.8, 3.5, 3.8 mm)の亜鉛めっき鋼管で、土壤中に埋設使用され、建屋基礎鉄筋などと接触しマクロセルを構成して管外面が腐食して貫通したものである。

3.2 実験方法

ワイブル分布(最小値の第三漸近分布)の取扱いは真壁が専門書に記述している手順に従ったが、主な手順は次のとおりである。⁽⁴⁾管肉厚別に(15 Aと20 Aと別にした)漏洩期間を分け、個々の漏洩期間を小さい順に並べ累積確率は2-2の(1)式と同じである。規準化変数 Y は $\ln \ln \frac{1}{1-F}$ である。これらの値をワイブル確率紙に漏洩期間に対してプロットした。ワイブルパラメータは確率紙を利用して求めた。

3.3 結果と考察

15 A～50 A管の漏洩期間をワイブル確率紙へプロットしたものを図5に示す。各管のデータは確率紙上直線近似できたので、漏洩期間はワイブル分布すると判断できる。直線の傾き m は、ワイブル分布の形状を示す形状パラメータで、尺度のパラメータ α と共に、平均寿命 μ と平均寿命 μ の信頼度 R を(8)、(9)式で与える。

$$\mu = \alpha^{1/m} \cdot \Gamma(1/m + 1) \quad (8)$$

$$R = e^{-\Gamma^m(1/m + 1)} \quad (9)$$

図5に示すごとく、各管の漏洩期間のワイブル分布は同程度の傾きであったので、(8)式から同一信頼度が与えられ、平均寿命は41%の信頼寿命である。平均寿命は、15 A：2.9年、20 A：3.5年、40 A：5.7年、50 A：5.8年になった。

マクロセル腐食の進行を管肉厚と平均寿命から推定した。各管の肉厚 W に対する平均寿命 t の関係を(10)式のようなべき乗の形で近似した。

$$W = a \cdot t^b \quad (a, b \text{ は定数}) \quad (10)$$

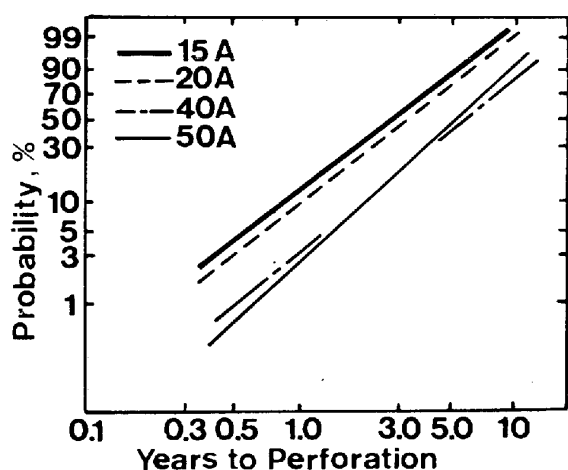


Fig.5 Weibull distribution of time to perforate.

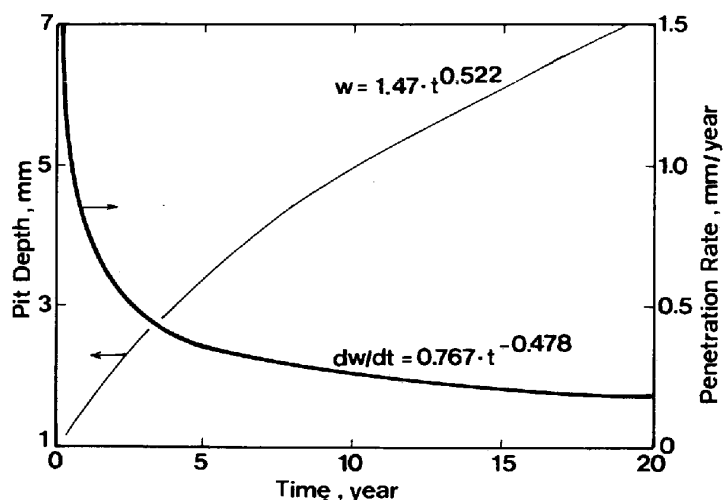


Fig.6 The depth of pit and the rate of penetration.

このとき管肉厚を侵食深さとして、侵食深さおよび腐食速度の経時変化を予測した。図6に示すように腐食速度は、初期において数 $mm/year$ で非常に速く、5年経過後でも約 $0.4 mm/year$ の速い速度であった。

4. まとめ

腐食現象は従来よりばらつきの多いものという解釈がされ、経験による定性的な表現がなされてきた。しかし装置や構造物の設計および保守に関する合理性、経済性の観点から信頼性工学的な見方が必要になってきていると考えられる。本報では、鋼管に生じた腐食事例を基に、①配管内面に生じた孔食の最大深さの推定法、あるいは孔食の成長速度や貫通寿命の推定法について述べ、②土壤に埋設配管された亜鉛めっき鋼管が、建屋基礎鉄筋などと接触して生じたマクロセルによって外面が腐食して貫通漏洩するまでの期間を統計的に整理し、同じ信頼度のもとで平均漏洩期間および腐食速度などを推定した。

5. 引用文献

- (1) グンベル(河田, 岩井, 加瀬訳): 極値統計学, 生産技術センター新社。
- (2) H.F.FINLEY, A.C.TONCRE: Materials protection, 3(1964)29。
- (3) 松島 巖: 防食技術, 25(1976)563。
- (4) 真壁 肇: 日本規格協会, ワイブル紙の使い方。