資 料 TECHNICAL NOTE

炭素鋼配管内面に生じた孔食深さの統計的性質†

正 村 克 身* 松 島 巖**

Statistical Characteristics of Pit Depth Observed on Inner Surface
of Carbon Steel Pipes

by

Katsumi MASAMURA* and Iwao MATSUSHIMA**

Statistical characteristics of pitting corrosion observed under tubacular on carbon steel used for fresh water pipes are discussed. Thirty three cases were analysed using the statistical method. The Gaussian distribution was applied for the distribution of pit depth in carbon steel. The mean and standard deviation of pit depth had no dependence on duration of use in practice. The standard deviation of pit depth rather than the mean is a good indicator for the estimation of potential occurrence of penetration. The index, $m+3\sigma$, is a good indicator for the occurrence of perforation. The standard deviation and mean of pit depth showed good correlation. It is difficult to estimate the life time of pipes using statistical analysis of pit depth because the law of pit growth is unclear.

キー・ワード：炭素鋼，孔食，統計的性質

1 緒 言

近年，腐食現象の統計的な性質に対する関心が高まり，種々の報告が行われている．特に，極値統計を石油タンクの底板やスラリーパイプラインの内面に生じた孔食の最大深さの推定に適用して，装置の損傷状況を把握することに成功した事例がいくつか報告されている¹⁾²⁾．現在，極値統計などの統計的手法を応用して，ある時点における損傷状況を評価することは充分可能である．このような取り扱いを行う上で実装置において孔食深さにどのような分布型にあてはめられるかなどの腐食現象の統計的性質を明らかにすることは，少ないデータで有効な情報を得るために重要である．

一方，装置の残存寿命を予測するためには，孔食などの腐食現象の進行速度に関する速度則が必要である．石川らは実働機器における局部腐食へ極値統計を系統的に適用して，各種パラメータの時間依存性を明らかにしている³⁾．本田らもスラリー配管に生じた孔食深さの解析の中で最大孔食深さの極値分布の時間依存性を調べ，配管の寿命を予測している⁴⁾．しかし，現在のところこのような事例はまだ少なく，任意の装置の腐食状況を調べて寿命を予測することはできない．

著者らは，これまでに多数の淡水配管の腐食事例を扱い，さびこぶ下に生じた孔食の深さを測定した．これらのデータを解析して，炭素鋼に生じるさびこぶ下の孔食の統計的な性質を調べた結果を報告する．あわ

せて，寿命予測に必要な孔食の進行速度の速度則を明らかにするために必要な考えかたを示す．

2 孔食深さの測定と分布

Table I に今回扱った事例16件（サンプル33本）の一覧を示す．使用環境は淡水に限定し，給水管，冷却循環水配管および温水配管である．これらの事例における主な腐食は，さびこぶ下に生じた孔食と電縫鋼管の溶接部に生じた溝状腐食である．溝状腐食の事例解析については既に報告した⁵⁾．溝状腐食を生じた配管はしばしば孔食を伴っており，本報では孔食を生じているものをえらび電縫部以外に生じている孔食を解析の対象とした．使用年数は6～20年であり，管のサイズは25～200 Aにわたっている．これらの事例は測定時には統計的な取り扱いを必ずしも意識していないので，データ数や測定サンプルの大きさがそろっていない．同様に，極値統計を意識していないので，孔食深さの最大値分布ではなく母分布を対象として論議する．取り扱った16件のうち孔食により貫通孔を生じたものは少なく，ボイラ補給水配管（使用4年）1件，給水管（使用6年および16年）2件および温水配管（使用6年および20年）2件の計5件である．このうち3件は配管継ぎ手のねじ部で生じていた．

Fig. 1 に配管内面に生じた孔食の外観を示す．Fig. 1 (a)の例は温水配管に20年使用した50 Aの管であり，ねじ部で貫通孔を生じている．Fig. 1 (b)の例は冷却循

† 原稿受理 昭和61年3月3日 Received Mar. 3, 1986

* 正 会 員 日本鋼管(株)中央研究所 川崎市川崎区南渡田, Technical Research Center, Nippon Kokan K.K., Kawasaki-ku, Kawasaki

** 日本鋼管(株)中央研究所 川崎市川崎区南渡田, Technical Research Center, Nippon Kokan K.K., Kawasaki-ku, Kawasaki

Table I. List of pipes analysed.

Sam- ple No.	Dia- meter	Len- gth	Dura- tion	Environment	Note
A-1	32 A	17.5 cm	17 year	Hot water	Pitting
A-2	60 A	17.0	17	Hot water	Pitting
B-1	150 A	60.0	20	Potable water	Pitting
B-4	50 A	50.0	20	Hot watwr	Pitting
B-8	50 A	50.0	20	Hot water	Pitting
C-1	50 A	49.0	20	Hot water return	Pitting
C-2	100 A	49.0	20	Potable water	Pitting
C-3	100 A	49.0	20	Potable water	Pitting
D-1	50 A	20.0	4	Boiler feed	Pitting
E-1	80 A	45.0	8	Recycled water	Grooving
E-3	50 A	15.0	8	Recycled water	Grooving
F-1	200 A	20.0	7	Recycled water	Grooving
F-2	200 A	20.0	7	Recycled water	Grooving
F-3	200 A	20.0	7	Recycled water	Grooving
F-4	80 A	20.0	7	Recycled water	Grooving
G-1	50 A	35.0	17	Potable water	Pitting
G-2	50 A	18.0	17	Potable water	Pitting
G-3	40 A	25.0	17	Potable water	Pitting
G-4	20 A	28.0	17	Potable water	Pitting
G-5	25 A	13.0	17	Potable water	Pitting
H-1	150 A	3.0	6	Potable water	Pitting
I-1	80 A	30.0	5	Potable water	Grooving
J-1	100 A	20.0	5	Recycled water	Grooving
K-1	125 A	50.0	5	Recycled water	Grooving
L-1	100 A	50.0	3	Recycled water	Pitting
M-1	80 A	40.0	3	Recycled water	Grooving
N-1	125 A	50.0	16	Potable water	Pitting
O-1	100 A	50.0	9	Potable water	Grooving
P-1	100 A	40.0	6	Hot water	Pitting
P-2	65 A	30.0	6	Hot water	Pitting
P-3	50 A	35.0	6	Hot water	Pitting
P-4	32 A	28.0	6	Hot water	Pitting

Fig. 2. Distribution of pit depth observed in pipe K-1.

Fig. 3. Distribution of pit depth on normal probability paper observed in pipes used for 3 years.

環水配管に3年使用した例である。孔食の発生は軽微であり、実用上は溝状腐食の方が重要である。

孔食深さの測定はデプスゲージで行い、通常の作業では任意に10～20個の孔食を選び測定する方法でデータを採取した。この方法では統計的な片寄りが生じる可能性があるため、分布の形状やパラメータの推定には20点以上の測定点があるものを使用した。

Fig. 2 にサンプルK-1の孔食深さのヒストグラムを

示す。この例では正規分布に近い形の分布を示している。使用年数3年の事例2件の孔食深さの分布の正規確率紙プロットを Fig. 3 に示す。いずれの例も正規確率紙上で直線になり、正規分布によく当てはめられることが分る。平均値は両者共に余り差はないが、標準偏差はサンプルL-1の方が大きい。使用17年の例を Fig. 4 に示す。いずれも正規分布を当てはめることができる。G-1～5に見られるように、同じ系統の

B-8

50A
Hot water
20y

L-1

100A
Recycled water
3y

(a) B-8 Hot water 20 years

(b) L-1 Recycled water 3 years

Fig. 1. Appearance of inner surface of pipes.

Fig. 4. Distribution of pit depth on normal probability paper observed in pipes used for 17 years.

装置であっても孔食深さの分布に差がある。これは使用環境が孔食の発生成長に大きく影響するためと考えられる。

他の測定結果もデータを正規分布で近似することが可能であったので、以後孔食深さの分布は正規分布に当てはめることとする。

3 分布パラメータの時間依存性

Table II に各サンプルの孔食深さのデータを正規

Table II. Stastical parameters and mean penetration rate of pit in the pipes.

Sample No.	$m(\text{mm})$	$\sigma(\text{mm})$	$m+3\sigma$ (mm)	v (mm/y)	n	Wall Thickness (mm)
A-1	1.59	0.49	3.06	0.09	19	3.50
A-2	1.14	0.17	1.65	0.07	9	4.20
B-1	0.60	0.13	0.99	0.03	14	5.00
B-4	0.93	0.23	1.62	0.05	13	3.80
B-8	1.48	0.26	2.26	0.07	19	3.80 Failed
C-1	0.65	0.16	1.10	0.03	20	3.80
C-2	1.26	0.20	1.86	0.06	20	4.50
C-3	1.63	0.26	2.41	0.08	39	4.50
D-1	1.85	0.69	3.92	0.46	20	3.80 Failed
E-1	1.56	0.45	2.91	0.20	19	4.20
E-2	0.27	0.09	0.54	0.03	5	3.80
E-3	0.46	0.11	0.79	0.06	10	3.80
F-1	1.54	0.25	2.29	0.29	10	5.80
F-2	1.37	0.22	2.02	0.20	10	5.80
F-3	1.50	0.17	2.01	0.21	10	5.80
F-4	1.81	0.35	2.86	0.26	10	3.80
G-1	1.51	0.55	3.16	0.09	20	3.80
G-2	0.55	0.19	1.12	0.03	20	3.80
G-5	0.91	0.26	1.69	0.05	19	2.80
H-1	0.97	0.56	2.65	0.16	8	5.00 Failed
I-1	1.25	0.20	1.85	0.25	22	4.20
J-1	1.46	0.49	2.93	0.29	20	4.50
K-1	1.39	0.27	2.20	0.28	39	4.50
L-1	1.38	0.31	2.31	0.46	15	4.50
M-1	1.20	0.14	1.62	0.40	11	4.20
N-1	2.04	0.79	4.41	0.13	20	4.50 Failed
O-1	2.24	0.14	2.66	0.25	59	4.50
P-1	2.10	0.54	3.72	0.35	10	4.50 Failed
P-2	0.82	0.23	1.51	0.14	10	4.20
P-3	1.90	0.28	2.74	0.32	10	3.80
P-4	1.02	0.29	1.89	0.17	10	3.5

分布として扱ったときの平均値 m と標準偏差 σ の値を示す。正規分布の99.9%点に対応する孔食深さの推定値としての $m+3\sigma$ の値、および平均値 m を使用年数で割って求めた孔食の平均進行速度 v を併せて示す。孔食の平均進行速度は最も小さいもので 0.03 mm/y、最大で 0.46 mm/y であった。 $m+3\sigma$ の値が配管肉厚に対して相対的に大きな場合に貫通孔が発生している。 m 、 σ などのパラメータの中では $m+3\sigma$ が孔食による事故を予測する指標となる。これは $m+3\sigma$ が最大孔食深さの近似値を与えるためと思われる。温水配管の孔食の平均進行速度は温度の低い場合と比べて必ずしも大きくない。

孔食深さの平均値と使用期間との関係を Fig. 5 に示す。孔食深さの平均値と使用期間の間には相関関係が認められない。また貫通孔を生じているサンプルの孔食深さの平均値は必ずしも大きくない。

Fig. 6 に使用期間と孔食深さの標準偏差との関係を示す。平均値と同様に使用時間との相関は認められな

Fig. 5. Relationship between mean pit depth and duration of use.

Fig. 6. Relationship between standard deviation of pit depth and duration of use.

い。しかし、貫通孔を生じているサンプルは標準偏差の大きなものであり、平均値の大小よりは標準偏差の大小の方が事故の発生に密接な関係があることが分る。

以上に示したように、事例の解析からは炭素鋼に生じる孔食の進行速度の速度則を求めることはできなかった。これは、実使用条件では環境の差が大きく、独立した配管内に生じた孔食深さを測定して整理しても求めたパラメータが時間に依存したものにならないためである。

Fig. 7 に標準偏差と平均値の相関を示す。平均値の大きなものほど標準偏差が大きくなる傾向がある。これは腐食が進行するにしたがって孔食深さの平均値が増大すると共に、孔食の深いものの裾野が広がり標準偏差が大きくなることを示している。32例中28例では標準偏差 σ は $0.4m < \sigma < 0.4(m-1)$ の範囲に有る。

Fig. 7. Relationship between mean pith depth and standard deviation of pit depth.

4 ループテストによる結果

淡水配管内面に生じるさびこぶ下の孔食の成長速度の速度則を事例から求めることができないため、ループテストを実施した。冷却循環水配管に全長 5m の 100A の試験管を取り付けて 1～3 年通水試験したサンプルの内面に生じた孔食深さの分布を Fig. 8 に示す。測定区画は全長 25.0 cm の 100A の鋼管の内面である。試験時間が長くなると分布が全体的に深い方へ移動することが分る。この場合、平均値が時間と共に増加しているのに対し、標準偏差はむしろ減少している。これは事例解析の結果とは一致しない。

Fig. 9 に最大孔食深さの極値確率プロットを示す。最大孔食深さの分布を求めるために測定単位区画の大きさを 12.5 cm の長さの管内面とし、14 区画測定した。1 年試験したものに生じた孔食の深さの分布は極値分布によく一致している。一方 3 年試験したものは極値確率紙上で折れ曲った直線となり、分布関数の値

Fig. 8. Distribution of pit depth observed in pipes tested for 1 and 3 years.

Fig. 9. Maximum pit depth on extreme probability paper observed in pipes tested for 1 and 3 years.

の大きな領域では 1 年試験したものとほぼ平行な直線上にあるが、分布関数の値の小さな領域ではこれより傾きの大きな直線上にある。測定の単位区画を変更しても分布の形状がほとんど変わらないことから考えると、この原因はサンプリング方法などの統計的な扱い方によるものではなく、わずかに 5m のサンプル中にも腐食のし方が違う部分が存在して異なる分布に従うデータが混在しているためと思われる。貫通孔が生じるかどうかを議論するとき問題となるのは分布関数の値の大きな部分であるから、 $F > 0.8$ 以上の部分の直線で比較すると位置パラメータ λ は使用年数が長くなると大きくなるがスケールパラメータ α は変化していない。これは、石川らが時間と共に α の値が大きくなるとする報告³⁾とは異なっている。本田らのデータ⁴⁾では α の値の時間依存性は明確ではない。 α の時間による変化は λ の変化よりも貫通孔が生じる確率に与える影響が大きく、重要な問題である。 α が時間と共に増加すると貫通する確率も時間と共に急激に増加する。今後検討すべき課題である。

5 考 察

淡水配管の内面に生じたさびこぶ下の孔食の深さの分布が正規分布に従うので、孔食深さの最大値の推定に二重指数分布を利用した極値統計を利用することが

可能である。しかし、正規分布から二重指数分布への漸近は遅いことが知られており、単位区画の大きさには注意をする必要がある。

孔食深さの分布のパラメータの中で事故が生じるかどうかにも最も影響を与えるのは、平均値 m よりも標準偏差 σ である。これは事例からも明らかであるが、孔食深さがある分布にしたがっているとき、貫通孔を生じる確率 F は次のように与えられる。

$$F = \Pr(x > x_{cr})$$

このとき x_{cr} は限界の肉厚である。この様子を Fig. 10 に示す。平均値が同じでも標準偏差 σ の大きい方が貫通孔を生じる確率が高くなる。同様のことが極値分布のスケールパラメータについても言える。

Fig. 10. Effect of standard deviation on the probability of penetration.

母分布の標準偏差の σ 増加は、最大孔食深さの極値分布の α の値を大きくする。事例解析から明らかとなった孔食深さの平均値が増加すると標準偏差が増加する関係は、石川らによって示された孔食の極値分布の α が時間と共に増加すると言う結論を間接的に支持するものである。しかし、制御された環境でのループテストの結果からはこの関係は確認されなかった。上にも述べたように、 α の値は事故の発生の確率に重要な

役割をもっているので α の時間依存性については今後にも十分に検討されるべきである。

最大孔食深さを推定する方法はいくつか考えられる。孔食深さの母分布を求めて $m+3\sigma$ の値を取るのもひとつの方法である。孔食の発生密度などの情報があれば、正規分布を利用して定量的な推定を行うことも不可能ではない。似た考え方として Champion は、Perforation factor として $m+2\sigma$ を提案している。

しかし、測定に要する労力と情報の量を比較すると賢明な方法とは言い難い。極値統計による方法は比較的簡単に定量的な推定が行える利点がある。しかし、十分な大きさのサンプルが得られない場合などはここに示したような方法で半定量的な推定を行うことは意味のあることと思われる。

本報では孔食の進行速度の速度則を決定することはできなかった。また、たとえ速度則が決定されたとしてもその誤差はかなり大きなものとなると思われる。したがって、ある時点における測定データだけで装置の寿命を予測することは、現時点ではかなり困難なことといわざるを得ない。今後この種のデータを積み上げて行くことが重要であると考えられる。

参 考 文 献

- 1) 柴田俊夫, 岡本勝群, 防食技術, **30**, 404 (1981).
- 2) 井上圭典, 石油技術協会誌, **47**, 419 (1982).
- 3) 石川雄一, 尾崎敏範, 保坂信義, 西田 脩, 防食技術, **29**, 502 (1980).
- 4) 本田正春, 酒井潤一, 松島 巖, 第41回腐食防食シンポジウム資料, p. 37 (1982) 腐食防食協会.
- 5) 正村克身, 松島 巖, 防食技術, **31**, 332 (1982).
- 6) 山本一雄, 第58回腐食防食シンポジウム資料, p. 14 (1984) 腐食防食協会.
- 7) Champion, J. Inst. Metals., **69**, 495 (1943).