

工業用水配管の腐食寿命予測方法

山本 一雄*・溝口 茂*・長野紳一郎*²
吉光 国正*²・野村 悦雄*²

Service Life Prediction of Industrial Pipe-line

Kazuo YAMAMOTO, Shigeru MIZOGUTI, Shinichiro NAGANO,
Kunimasa YOSHIMITU and Etsuo NOMURA

Synopsis :

To perform the water-leak protection and effective renewal of industrial pipe line, the life-time prediction has been discussed on the basis of the measurements of the wall thickness of pipes in service. The followings are concluded: (1) the life time of a pipe line in inside corrosion can be predicted from the maximum pitting depth estimated by the extreme value statistical analysis of the data obtained from the relation between corrosion pit depth and rust-lump height. (2) the grooving depth of ERW pipes can be measured by the ultrasonic angle beam testing method quantitatively. If the supply water is drained, the estimation of the grooving depth is qualitatively made by means of the X-ray transmission method.

1. 緒 言

パイプラインは種々な工業分野に利用されており、使用実績の歴史も古い。製鉄所においても、工業用水確保のために古くから鑄鉄管が使われてきた。最近では施工技術の進歩により、この分野における鋼管の利用度が高くなってきている。パイプラインの保全において問題になるのは、腐食による漏水事故であるが、鑄鉄管については、すでに「黒鉛化腐食度と強度劣化の関係」から経年的な保全が可能であることを明らかにしたり¹⁾。しかし鋼管の場合は 10~20 年の経過で孔食的腐食になることがあり、また電縫鋼管では 1~5 年の短期間で溝食 (Grooving corrosion) による溶接部 (シーム=Seam) からの漏水が生じる場合がある²⁾ ことから、その診断技術の確立が現場的な強い要請となつている。本研究は、このような要請にこたえ、鋼管パイプラインの漏水事故を未然に防止するとともに計画的な更新の判断基準を得るため、(1) 埋設鋼管 (実ライン) の内面孔食深さの測定方法と極値統計解析による腐食寿命推定、(2) 超音波斜角探傷法 (UST) および X 線透過撮影法による電縫鋼管の溝食深さ測定法について検討したものである。

2. 埋設鋼管内面の孔食深さ測定方法と極値統計解析による寿命推定

2.1 調査配管の履歴

調査した配管は昭和 13 年に埋設され、約 45 年経過

した、工業用水 (淡水) を製鉄所に送水している稼動中の、STPY-1000 A (公称管厚 8.7 mm)、総延長 1 km のパイプラインである。鋼管内面はコールタールエナメル塗装され、外面はアスファルトジュート被覆が施されていた。管路のほとんどが砂地に埋設されており、試堀によつても外面からの腐食は認められず、電食が生じる環境域でないため、配管の寿命は内面からの孔食に支配されていた。したがつて配管の腐食寿命推定のためには、内面孔食深さ (残厚) の測定が必要である。

2.2 孔食深さの測定

調査配管は埋設かつ稼動中であるため破壊検査は行えず、調査のための停水時間も極力短くする必要がある。したがつて、孔食深さの測定は非破壊で、しかも短時間に終了する方法でなければならない。

2.2.1 測定方法

非破壊かつ停水時間の短いことから、全長 1 km の管路の任意の連続した 10 m を抽出し、10 等分した 1 m を単位測定範囲として、それぞれの内面全周の孔食深さを測定した。孔食深さの測定は、Fig. 1 に示すようなプラスチック (粘土) による型取り法を採用した。型取りは、1 m の単位測定範囲に存在する錆こぶの大きいものから順に 5 箇所を選んで、ケレンによる錆こぶ除去後、その直下の食孔について行つた。錆こぶの大きいものを選んで型取りしたのは、別途昭和 10 年布設、47 年経過した淡水配管・STPY-1200 A、2 m を用いて調査した Fig. 2 に示す「錆こぶ高さと孔食深さの関係」に

昭和 58 年 10 月本会講演大会にて発表 昭和 59 年 3 月 8 日受付 (Received Mar. 8, 1984)

* 新日本製鉄 (株) 八幡技術研究部 (Yawata Technical Research Laboratories, Nippon Steel Corp., 1-1-1 Edamitsu Yawatahigashi-ku Kitakyushu 805)

*² 新日本製鉄 (株) 八幡製鉄所 (Yawata Works, Nippon Steel Corp.)

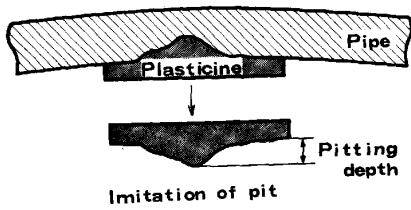


Fig. 1. Measurement procedure of pitting depth by plasticine.

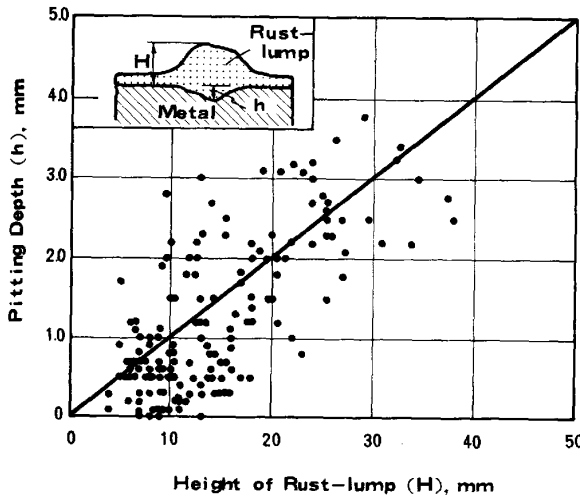


Fig. 2. Relationship between pitting depth and height of rust-lump.

Table 1. Estimation of extreme parameter by MVLUE method.

i	X_i	$F(x_i)$	$a_i \cdot X_i$	$b_i \cdot X_i$
1	3.0	9.1	0.669	-1.043
2	3.0	18.2	0.486	-0.273
3	3.5	27.3	0.468	-0.067
4	3.5	36.4	0.395	0.078
5	4.0	45.4	0.383	0.195
6	4.0	54.5	0.322	0.264
7	4.0	63.6	0.268	0.308
8	4.5	72.7	0.244	0.372
9	4.5	81.8	0.188	0.376
10	5.0	90.9	0.145	0.390

$\lambda = 3.568, \alpha = 0.600$
 $\therefore X = 3.568 + 0.6Y$

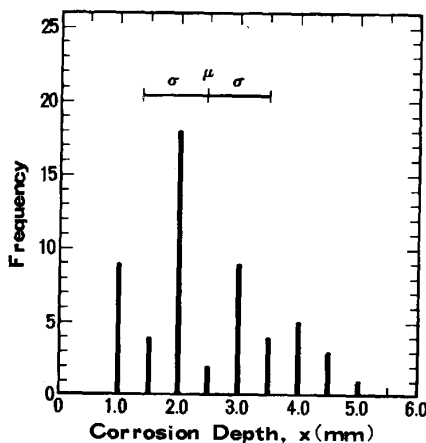


Fig. 3. Histogram of the corrosion depth observed in the inside surface of the buried steel pipe.

もとづいている。

2.2.2 測定結果および極値統計解析

単位測定範囲ごとの最大孔食深さ (X_i) を Table 1 に、測定値のヒストグラムを Fig. 3 に示す。この結果から、調査配管の 10 m の限られた長さ範囲に存在する孔食深さは、平均 2.5 mm、最大 5 mm であることがわかった。しかし、実際に欲しい情報は 1 km の管路の全長に存在するであろう最大孔食深さ (極値) である。この極値の推定に、最近腐食研究で利用されつつある極値統計解析³⁾⁴⁾の適用を試みた。

(1) 極値確率紙へのプロット

1 m の単位測定範囲で得られた最大孔食深さ (X_i) を小さい順にならべ、累積確率 ($F(x)$) を求め (Table 1) 極値確率紙へプロットした (Fig. 4)。 $X_i - F(x)$ の間に直線関係が認められたことから、最小分散推定法 (MVLUE法) の係数表 (データ数、順序数、係数 a_i, b_i を示す) より二重指数分布のパラメータ ($\lambda = \sum_{i=1}^{10} a_i \cdot x_i$,

$\alpha = \sum_{i=1}^{10} b_i \cdot X_i$) を試算し、Fig. 4 に示した X (孔食深さ) = $3.568 + 0.6Y$ の回帰式を得た。

(2) 極値の推定

管路の全長 1 km に存在する極値すなわち最も深い孔食は、1 m ごとの単位測定範囲における孔食深さの測定を 1000 回くり返せば発見できる。すなわち、再帰期間 (T) = $1000 \text{ m}/1 \text{ m} = 1000$ に相当する孔食深さが、1 km の管路に存在する極値となる。この極値を Fig. 4 から

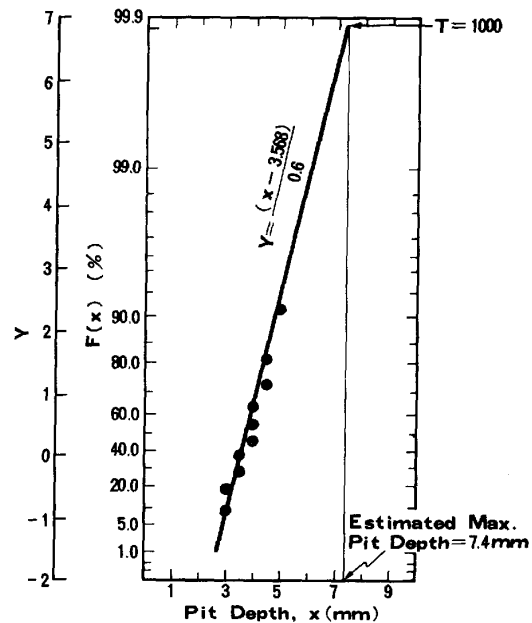


Fig. 4. Extreme probability plots of the maximum corrosion depth observed in the inside surface of the buried pipe.

求めると 7.4 mm になる。

2.2.3 寿命推定

調査配管は塗装鋼管であることから、稼動初期の腐食が著しく抑制された状態であると考え、1年目の孔食深さを 0.01 mm と仮定した。Fig. 5 は、この1年目の孔食深さ 0.01 mm と現時点での推定最大孔食深さ（極値）7.4 mm を経過時間に対して両対数プロットしたものである。その結果、調査配管の寿命すなわち孔食深さが初期管厚の 8.7 mm に達し、貫通孔を生じる時期は、Fig. 5 の直線から稼動後 47~48 年と推定できる。なお Fig. 5 の直線上の経過年数 27 年に対応する孔食深さのプロットは、調査配管と同じ環境、同じ仕様で使用された STPY・1200 A について、同一手法の極値統計解析により得られた極値である。このことから、Fig. 5 の寿命予測直線は、タールエナメル塗装鋼管の長期の寿命予測に適用できる可能性がある。

2.3 考察および結論

解析結果より、調査配管は 2~3 年後に貫通孔の発生による漏水が予想された。ところで管の初期厚さおよび孔食深さの測定には誤差があるため、これを考慮する必要がある。昭和 10 年当時の製造許容差が不明のため、JIS 規格で判断すると、厚さは $\pm 10\%$ （初期管厚は 7.8 mm~10 mm となる）、また測定器の精度は ± 0.25 mm（最大孔食深さは 7.2 mm~7.6 mm となる）であるため、これらの条件を加味すれば、調査配管は最悪の場合、現時点でも漏水することが考えられた。実際、本調

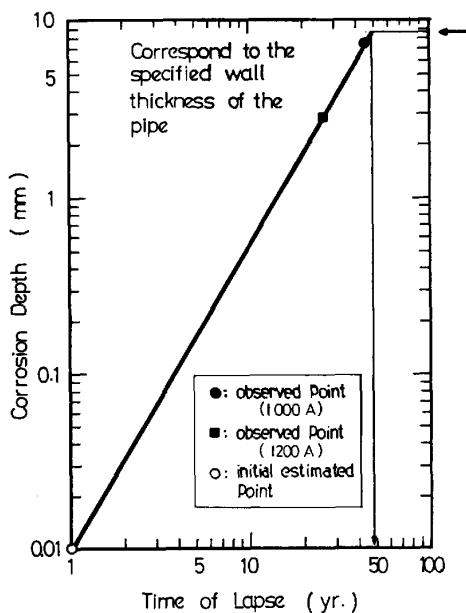


Fig. 5. Relationship between duration period and maximum corrosion depth estimated from the extreme statistical analysis.

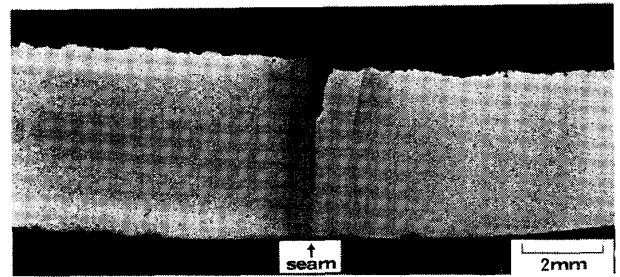
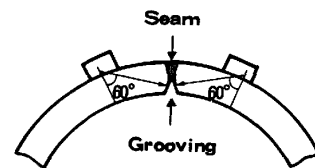


Photo. 1. An example of the grooving corrosion of a seam portion in soft water.



Couplant : Glycerine
Surface Condition : Finishing with sand paper.
Sensitivity : Echo Height over 5%

Fig. 6. Schematic representation of UST examination technique.

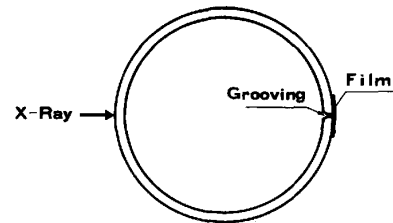


Fig. 7. Schematic representation of X-ray examination technique.

査は昭和 58 年 3 月に実施したが、その後 1 年をまたずに孔食による漏水事故が 2 回発生し、解析結果を裏づけることになった。なお、配管の保全是孔食深さの平均が 2.5 mm 程度であったことから、土圧、水圧のいずれにも耐え得ると判断して、孔食の進行防止による配管の再生すなわちモルタルライニング工法を採用することにした。

3. 非破壊による電縫鋼管の溝食深さの測定

電縫鋼管に生じる溝食は、Photo. 1 に示すようにシーム部に発生した V 字型の連続した腐食現象である。この溝食は、その先端が鋭い切り欠きのために通常の超音波厚み計では、外面からの残厚測定が困難であることから、他の簡便な方法を検討した。

3.1 実験方法

稼動中すなわち通水状態でも溝食深さの測定が可能な手段として、超音波斜角探傷法を用いた。また補助手段として X 線透過撮影法を採用した。実験は、(1) 約 4

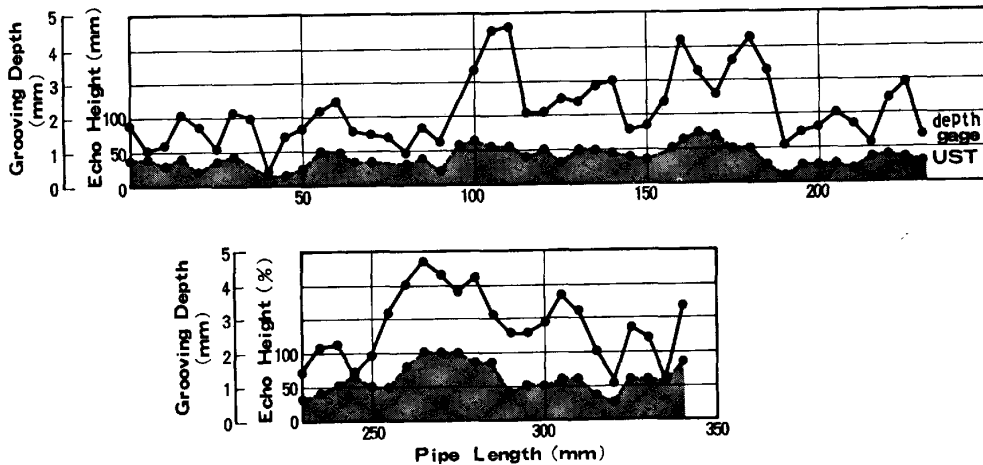


Fig. 8. Relation between of echo height and grooving depth.

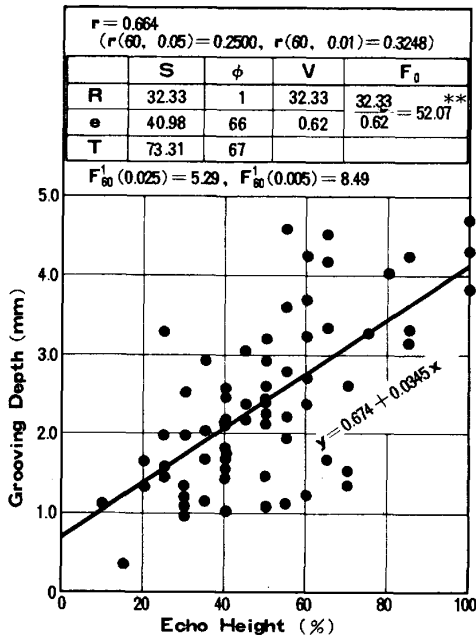


Fig. 9. Relation between grooving depth and echo height.

年間使用されて深い溝食を生じた淡水配管 (SGP・150 A, 切り出し試験材) による基礎実験, (2) 海水通水後 7 カ月経過しているフィールドテストライン (SGP・250 A, 耐溝食電縫鋼管・200 A) への適用試験により検討した。

3.1.1 超音波斜角探傷法による溝食深さ測定方法

Fig. 6 に示すように, 管の外表面シーム部の両側, 屈折角 60° の位置を軸方向に 5 mm ピッチで探触子を走査し, 5% 以上のピークエコーを記録した。なお探触子の接触面は管の曲率に合わせた。測定方法および感度設定の詳細は JIS Z 3060 にしたがった。

3.1.2 X線透過撮影法による溝食深さ測定方法

Fig. 7 に示すような二重管撮影法によりシーム部の透過撮影を行い, フィルムの濃淡で溝食深さの定性評価をした。

3.2 実験結果

3.2.1 溝食深さとエコー高さの関係

切り出した淡水配管 (内面に腐食生成物すなわち錆が付着したままの状態) のシーム部について超音波斜角探傷検査を行って得たエコー高さ (シーム部左右のいずれか高いものを採用) と実測溝食深さ (抑制剤入り 10% 硫酸水溶液により脱錆後, ディプスゲージで測定) の間には, Fig. 8 に示すように良い対応があった。Fig. 9 に両者の関係を表す散布図を示すが, 統計処理によっても高度の相関が認められ, 回帰分析を行った結果

$$\text{溝食深さ (Y)} = 0.674 + 0.0345 \cdot$$

$$\text{エコー高さ (X)} \dots\dots\dots (1)$$

の回帰式が得られた。

3.2.2 X線透過撮影像と溝食深さの関係

3.2.1 で検査したものと同一の淡水配管について, シーム部の X 線透過撮影を行った結果を, 実測溝食深さと対応させて Fig. 10 に示す。定性的ではあるが, 溝食深さと写真のシーム部欠陥像の間には良い相関が認められる。

3.3 フィールドテストラインへの適用結果

Fig. 11 に示すような 1000 mm の電縫鋼管を絶縁継手で接続し, 海水によるフィールドテストを行っているラインで, 通水状態での超音波斜角探傷検査および水ぬき後 X 線透過撮影を行った結果を Fig. 12, Photo. 2 に示す。

(1) 市販の電縫鋼管 (SGP) は, 超音波斜角探傷検査で, 検査長さ 300 mm の全長に 5% 以上のエコーが

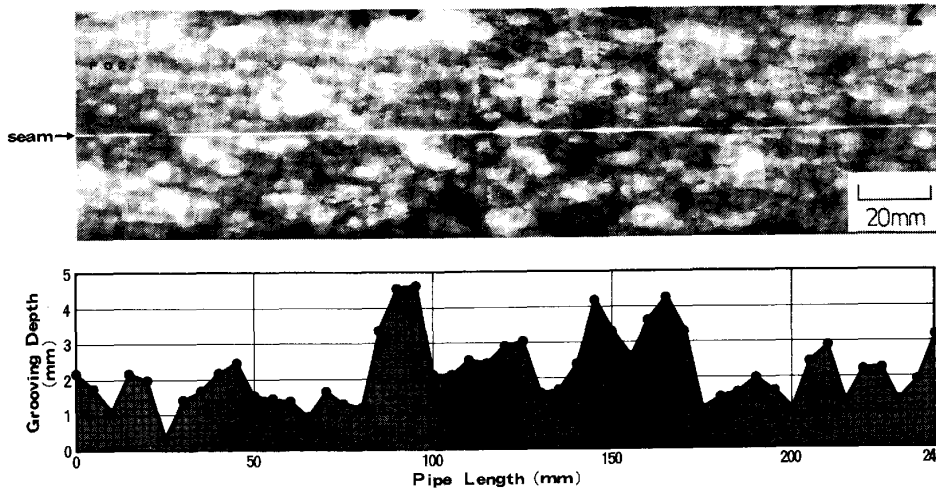


Fig. 10. Relation between X-ray examination and grooving depth.
(steel : SGP150A)

検出された。このエコー高さ（上下のいずれか高いものを採用）を(1)式にあてはめて溝食深さを算出すると

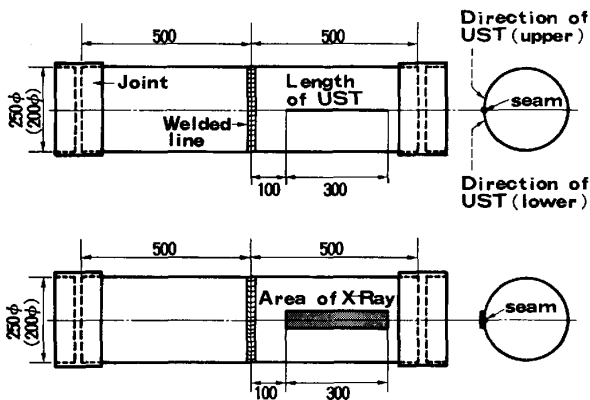


Fig. 11. Sketch diagrams on the location of a test pipe examined by UST or X-ray.

Fig. 12・下段のようになり、最大 1.75 mm の溝食が発生していると推定された。この結果は Photo. 2 に示した水ぬき後のX線透過撮影像とも良い対応を示している。

(2) 比較のため、同一条件でフィールドテスト中の Low S-Cu-Ti 系の耐溝食電縫鋼管についても、シーム部の超音波斜角探傷検査を行ったが、エコーはまったく検出されなかった。またX線透過撮影像でも、Photo. 3 に示すようにシーム部の溝食発生は認められなかった。

3.4 考察

(1) 電縫鋼管のシーム部に発生する溝食は、超音波斜角探傷によつて定量評価が可能であることがわかった。これは、溝食の形状がV字型でかつ周辺の母材があまり腐食しないという特殊な腐食形態であることによる。すなわち、溝食が JIS G 0582 「鋼管の超音波探傷

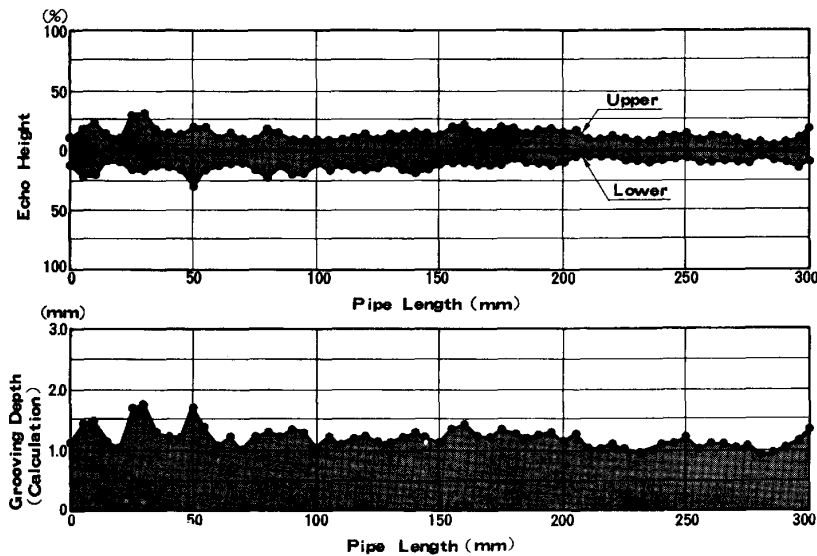
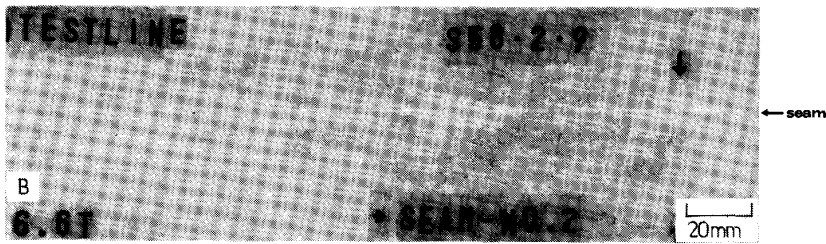
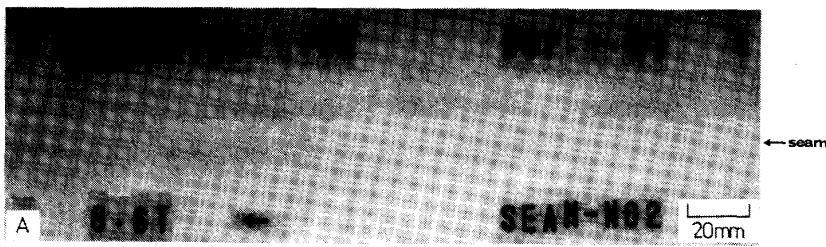


Fig. 12. Comparison of echo height and grooving depth obtained from the field test of SGP.



(A) before field test.
(B) after field test.

Photo. 2. Examples of the radiographs of the seam portion obtained from X-ray examination.
(Steel : SGP)



Photo. 3. Radiograph of the seam portion obtained from X-ray examination after field test.
(Steel : Low S-Cu-Ti)

検査方法」で規定されている対比試験片の人工きず“Vみぞ”に相似していることが定量評価を可能にしたものである。ただし、本実験の範囲では(1)式に示したように、深さ 0.674 mm 以下の溝食は、その有無が判定できない。したがって 5% 未満のエコーのみでも、0.674 mm の溝食発生の可能性があるため、重要な配管の場合には水ぬきによる X 線透過撮影の併用が望まれる。

(2) 溝食は同一環境の管路ならば、その全長にほぼ均一に発生すると考えられる。したがって、稼動状態の配管の一定長さを定期的に超音波斜角探傷検査することにより、溝食深さの経時変化から配管の寿命予測と更新計画が可能となる。

4. 結 び

本報では稼動中の活きた配管の腐食寿命を、おもに現場測定により予測する方法を検討し、以下のことを明らかにした。

(1) 内面からの孔食が支配的な鋼管の場合、錆こぶ高さと孔食深さの関係を利用したプラスチックによる食孔の型取りと極値統計解析を組み合わせた最大孔食深さ推定により、腐食寿命の予測が可能である。

(2) 電縫鋼管の溝食深さは、通水状態でも、外面からの超音波斜角探傷検査で定量評価すなわち寿命予測ができる。水ぬきが可能ならば、X 線透過撮影法でも定性評価ができる。

文 献

- 1) 山本一雄, 溝口 茂, 吉光国正, 川崎淳司: 防食技術, 32 (1983), p. 157
- 2) 正村克美, 松島 巖: 防食技術, 31 (1982), p. 332
- 3) E. J. GUMBEL: Statistics of Extremes (1958) [Columbia Univ. Press]; 河田竜一, 岩井重久, 加瀬滋男監訳: 極値統計学 (1978) [生産技術センター新社]
- 4) 第 41 回腐食防食シンポジウム資料 (極値統計による寿命予測) (1982) [腐食防食協会]