

論 文

大径溶接鋼管の内外面磁粉探傷

大西 英明*・竹腰 篤尚*・山根 孝夫*
石坂 陽一*・小谷 修一*・坪井 勇*²

Magnetic Particle Inspection Technique for the Entire Surface of the Large Diameter Pipe

Eimei OHNISHI, Atsuhisa TAKEKOSHI, Takao YAMANE,
Youichi ISHIZAKA, Syuichi KOTANI and Isamu TSUBOI

Synopsis:

In order to improve the surface quality assurance of the pipe, Nippon Kokan K. K. constructed the magnetic particle flaw detection equipment for the complete outside and inside surface of the pipe.

Magnetic particle inspection has been used for a long time, but not a few techniques have depended on customary practice. Then, we investigated theoretically diffusion of magnetic flux and method of evaluation of residual magnetism.

The results obtained are summarized as follows:

- (1) The theoretical model for a calculation of residual magnetism is made.
- (2) The new method of evaluation of residual magnetism by artificial defects is established.

The magnetic particle flaw detection equipment for the large diameter pipe, that was installed based on the previous investigations, has been running favourably since June 1983.

1. 結 言

大径溶接鋼管の品質に対する要求は、石油輸送ラインの高圧化に代表されるように用途が多様化するにつれて、ますます厳しくなっている。特に割れに代表される先端形状の鋭い表面欠陥は微小にもかかわらず、破壊力学的に非常に有害である。

当社では大径溶接鋼管の品質保証体制の充実・強化をはかるため、管体内外面を高効率で検査する磁粉探傷装置を専用検査ラインに新設した。磁粉探傷は万国共通の技術として確立しているが、経験と慣習に依存するところが大きく、理論的に顧みられることの少ない分野であった。本論文では(1)磁化過程の理論的考察と、(2)考え方に不合理な点のあつた残留磁気の確性方法に関する新しい方法の開発、およびこれらの結果に基づく(3)大径溶接鋼管の内外面磁粉探傷装置について述べる。

2. 磁粉探傷の原理と方式

磁粉探傷の原理と方式を簡単に述べる。

2.1 磁粉探傷の原理

試験品を磁化したとき、もし試験品の表面または表層下に欠陥があると、その欠陥によつて磁束がさえぎられ、その欠陥の存在する表面に磁束の洩れを生じ、その部分に小さな磁極ができる。もしこの部分に微細な鉄粉をかけると、この鉄粉は磁極に吸い付けられ、欠陥上に鉄粉による凝集模様ができる。この凝集模様の幅は欠陥幅の数倍から数十倍になり、欠陥幅を拡大するため、容易に欠陥の存在を知ることができる。この様子を Fig. 1 (a) に示す。また磁粉の凝集模様を見やすくするため、通常蛍光染料をまぶした鉄粉(蛍光磁粉)を用い、紫外線を照射して検査する。また磁粉は通常水中に懸濁させて(磁粉液)使用する。

2.2 磁粉探傷の方式

磁粉探傷は、磁粉液の適用時期により、連続法と残留法の2つに分類される。連続法は試験品の磁化中に磁粉液をかける方法で、磁化電流は磁粉液の流れが完全に止まるまで保持する必要がある。一方残留法は磁化後に磁粉液を適用する方法で、磁化電流は連続法に比べて短時間流せば良く、また検査能率が高い利点を有する。一般

昭和 58 年 10 月本会講演大会にて発表 昭和 58 年 11 月 9 日受付 (Received Nov. 9, 1983)

* 日本鋼管(株)福山製鉄所 (Fukuyama Works, Nippon Kokan K. K., 1 Kokan-cho Fukuyama 721)

*² 日本鋼管(株)福山製鉄所 (現: 日本鋼管(株)鉄鋼技術部) (Fukuyama Works, Now Iron and Steel Technology Department, Nippon Kokan K. K.)

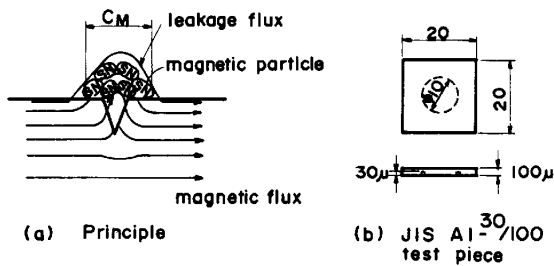


Fig. 1. Principle and flux indicator of magnetic particle inspection.

に大径溶接鋼管を磁化する場合に磁化電流が非常に大きくなるので、通電時間の短い残留法が採用されている。

2.3 有効磁場の確性方法

磁粉探傷の場合、試験品の有効磁場の方向と強さが適正かどうかを調べるのに JIS A 形標準試験片¹⁾を用いる。この JIS A 形標準試験片は厚さ 100 μm または 50 μm の軟鉄板に円形または直線状の人工欠陥を加工したもので、JIS A1-30/100 (円形) の例を Fig. 1(b) に示す。この試験片は人工欠陥の加工してある面を試験品側に密着するように貼り付けて使用する。一般にこの試験片に明瞭な磁粉模様が形成されれば、装置・磁粉液等の性能が検査に十分であるとされている。

後述するが、この標準試験片は連続法を前提として作られたもので、残留法にはこれに相当する標準試験片がない。これは各国の磁粉探傷規格^{2)~4)}も同様である。

3. 磁化過程

残留法の場合、鋼材の磁気特性や通電時間が残留磁気に影響を及ぼすことは経験的に知られている。この残留磁気の強さが欠陥の磁粉模様の現れ方を支配するが、今までこの残留磁気について理論的に解析した例は無い。筆者らは鋼材内部への磁界の拡散モデルを用いて残留磁気分布を推定することに成功した。

3.1 鋼材内部への磁界の拡散

一般に電流による外部磁界によつて金属を磁化する場合、金属表面に生ずる渦電流によるシールド効果のため内部まで一瞬に磁化されず、徐々に磁化される。非磁性体については解析例⁵⁾があり、中心磁束密度が表面の約 60% になる時間 τ は次式で表されることが知られている。

$$\tau = \mu \sigma d^2 / \pi^2 \dots \dots \dots (1)$$

ここで μ (H/m) は透磁率、 σ (Ω/m) は導電率、 d (m) は材料の厚みである。しかし鋼材のような磁性体については解析例が無く、残留磁気の強さを推定することが困難

であつた。

3.1.1 鋼管の場合の磁界拡散モデル

鋼管の中心においた導体に電流を流すことにより鋼管を磁化する方法 (電流貫通法) では、Fig. 2(a) に示すように通電の瞬間から鋼管の内外面には電流に比例した磁界 H_1 , H_2 が存在する。(Appendix 参照) 大径溶接鋼管では半径 R_1 (R_2) に対して肉厚 d が小さいので $H_1 = H_2$ と近似できる。また円周の一部に対して磁界の拡散を解けば、すべての部分に適用できる。この場合の磁界の拡散方程式は Fig. 2(a) のモデルについて次のとおり表すことができる。

$$\frac{1}{\mu(H_x)\sigma} \cdot \frac{\partial^2(\mu(H_x) \cdot H_x)}{\partial z^2} = \frac{\partial(\mu(H_x) \cdot H_x)}{\partial t} \dots \dots \dots (2')$$

ここで、 $\mu(H_x)$ は数値計算の都合上、 H_x が多少変化しても一定値であると仮定し、(2') 式を変形して (2) 式を得る。この仮定が妥当であることは、実験で確認できた。

$$\frac{1}{\sigma} \cdot \frac{\partial^2 H_x}{\partial z^2} = \mu(H_x) \cdot \frac{\partial H_x}{\partial t} \dots \dots \dots (2)$$

ここで、 H_x は鋼材内部の磁界の強さ、 z は表面からの深さ、 t は時間を表す。

(1) 鋼材の B-H 曲線の数値上の取り扱い

(2) 式を解くために、鋼材の B-H 曲線を Fig. 2(b) のようにモデル化した。磁化は原点 O から初期磁化曲線 a 上を動き、(H_x , B_x) まで磁化されて戻る場合は飽和後の曲線 c と相似な曲線 b に沿つて戻る。この場合の残留磁束密度 B_{rx} は次式とする。

$$B_{rx} = B_x / B_{xu} \cdot B_{rmax} \dots \dots \dots (3)$$

再び磁化された場合は上記曲線 b から曲線 a に移る。

透磁率 $\mu(H_x)$ は B-H 曲線の各点における傾きとした。 $\mu(H_x)$ は鋼材内部の各位置における磁化状態によつて異なる値となる。

$$\mu(H_x) = \Delta B_x / \Delta H_x \dots \dots \dots (4)$$

(2) 鋼材の B-H 曲線の測定例

最近の鋼材の特徴的 B-H 曲線の測定例を Fig. 3 に示す。数値解析ではこれを Fig. 2(b) のモデルに基づき折れ線で近似した。

3.1.2 直流電流による磁化

残留法における磁化方法は直流電流と衝撃電流の 2 とおり考えられるが、まず直流電流による磁界の拡散を計算する。Fig. 4 は Fig. 3(a) に示す B-H 曲線をもつ鋼管 ($d=50$ mm) に対し、磁界の強さ $H_0=90$ Oe、通電時間 0.5 s の条件で磁化したときの内面および外面の表層下 5 mm までの通電中の磁束密度 B_x と残留磁束

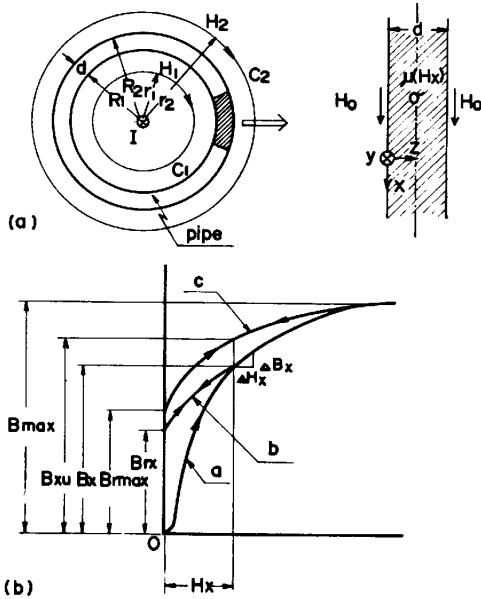


Fig. 2. Model of magnetic flux diffusion for pipe.

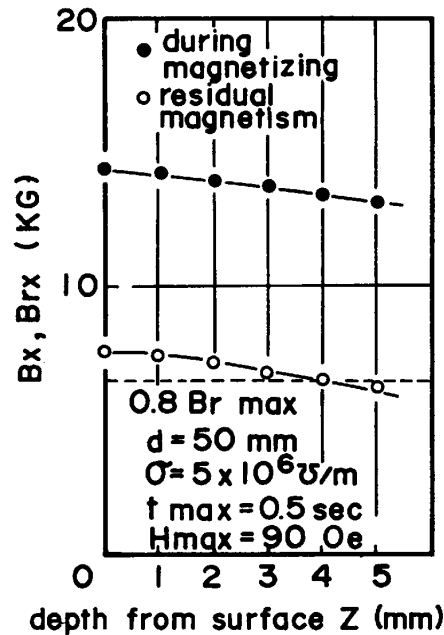
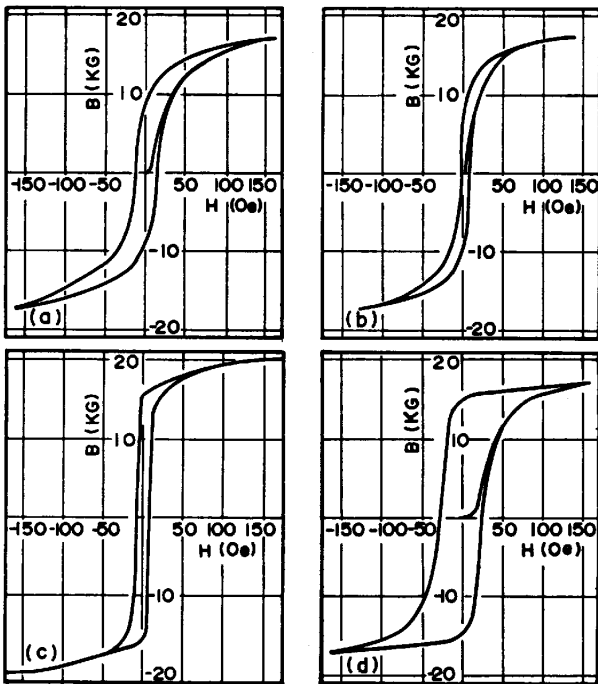


Fig. 4. Calculation result of residual magnetism by D. C. Current.



(a) material A (b) material B (c) material C (d) material D
Fig. 3. Examples of B-H curve.

密度 B_{rx} の分布を計算したものである。残留法に必要な残留磁束密度は試験品の磁気特性や形状によつて変わるため、一概に何 KG 以上と言うことはできないが、経験的に言われている飽和まで磁化したときの残留磁束密度 B_{rmax} の 80% 以上とすると、Fig. 4 の結果は 1 回の磁化で表層下数 mm まで十分な残留磁束密度の得られることを示している。これは Fig. 3(b)~(d) の鋼材についても同様の結果が得られた。

3.1.3 衝撃電流による磁化⁶⁾

衝撃電流の通電時間は 1/120 s (単相半波整流の場合) 程度のため、1 回の通電で表層下深くまで磁化できるとは考え難い。しかし衝撃電流を何回か加えると鋼材の B-H 特性により内部まで拡散が進むはずである。ここでは電流波形を 60 Hz の単相半波整流回路の過渡現象解として計算した結果を示す。

(1) 磁界の拡散状況と残留磁束密度分布

Fig. 5(a) (b) は表層下 5 mm までの各位置における磁束密度の最大値 B_x と残留磁束密度 B_{rx} の通電回数による変化の計算結果である。十分な残留磁気を得るためには 5 回の通電を必要とすることがわかつた。

Fig. 6 は管体に巻いたコイルで、衝撃電流の通電回数による残留磁束密度を測定した結果と計算結果を比較したものである。両者は良く一致しており、計算モデルの妥当性を示している。(なお、Fig. 6 の磁束密度は測定値と計算値を比較するために、管厚に対する平均値に換算してある。)

(2) 管厚の影響

管厚の残留磁気を与える影響は Fig. 3(a) の鋼材について計算した。Fig. 5(c) は磁界の強さの最大値 90 Oe で磁化したとき、表層下 3 mm の位置で十分な残留磁気を得るための通電回数を示したものである。管厚が薄くても 3 回以上の通電が必要であるが、管厚が厚くなると内外面からの拡散重畳効果が少なくなるため 5 回通電が必要である。

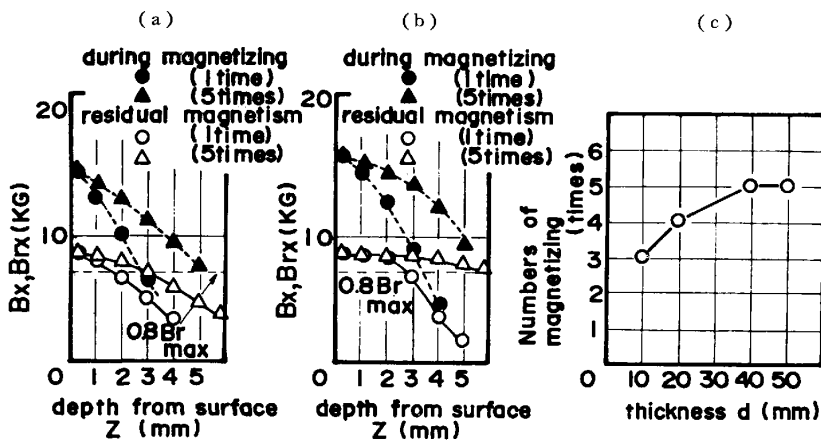


Fig. 5. Calculation results of flash magnetization.

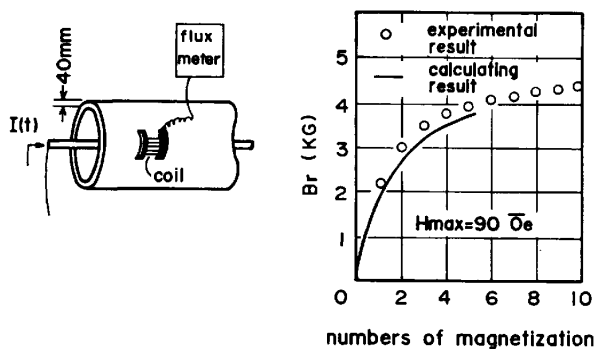


Fig. 6. Comparison of residual magnetism of experiment with calculation (flash magnetization).

3.2 磁化電源の容量

以上の結果に基づき、直流電流と衝撃電流の電源容量を比較する。JIS では探傷に必要な磁場の強さを 80~90 Oe としている。磁界の強さ 80 Oe を発生するための出力電流を大径溶接鋼管の最大径 ($\phi 1626$) から計算すると約 33000 A となる。このような大電流になると通常は問題にならない配線のインダクタンスの影響が大きくなり、4000~5000 A 以上では直流電流の方が変圧器容量が小さく経済的である。

4. 残留磁気の確性方法

4.1 新しい確性方法の確立

現在の磁粉探傷規格には残留磁束密度の大きさを確性する手段が、連続法の標準試験片のように明確になっていない。そのため便宜的に標準試験片を使つて確性を行っている場合も少なくない。しかし JIS では標準試験片の残留法への適用を次のように除外している。「残留法においては、A 形標準試験片の磁粉模様は試験品の残留磁束密度に関係するが、試験品の材質、A 形標準試験片と試験面との接触状態の影響及び試験品に生じた磁極の影響を大きく受けるので、直接試験品の残留磁束密度を調べることは、一応 A 形標準試験片の目的から除外した。」

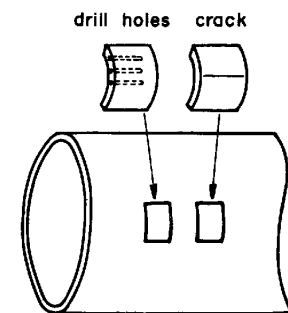


Fig. 7. Calibration pipe.

そのため筆者らは本来の目的に沿つて、残留磁束密度の大きさが適正かどうかを判断するために、微細な人工欠陥を加工した鋼管による残留磁束密度の確性方法を新たに確立した。人工欠陥及び JIS A 形標準試験片の感度を連続法で対応付けることにより、人工欠陥は JIS とのトレーサビリティを確保している。

筆者らはこの方法に使用する人工欠陥として(1)疲労クラックと(2)試験品の表面に平行で深さの異なるドリルホールを 2 種類を開発した。この人工欠陥は Fig. 7 のように鋼管に埋め込んで使用する。

4.2 残留磁束密度確性用人工欠陥とその評価

4.2.1 破壊力学によるクラックの加工

疲労試験機で作つたクラックの開口幅は極めて微細でしかも自然欠陥に非常に近いものである。筆者らはこのクラックを表面から研削し、その先端部を用いれば更に微細な欠陥が得られると考えた。クラックは平板に加工したノコ疵から疲労試験機の 3 点曲げにより作成した。加工直後のクラックは微細ではあるが、確性用としては大きすぎるため、連続法で JIS A 形標準試験片 (A1-30/100) と同等の検出感度になるまで表面を研削して仕上げた。このように加工した複数のクラックの断面寸法は幅、深さともほぼ同等で、破壊力学理論で計算した開口幅とも一致し、加工再現性を確認できた。その大きさは幅 0.5 μm 、深 0.2~0.3 mm で、その例を

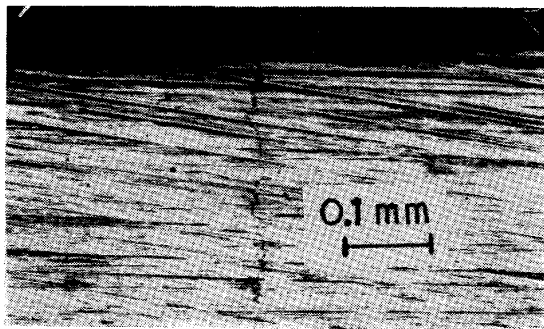


Photo. 1. A section of a crack.

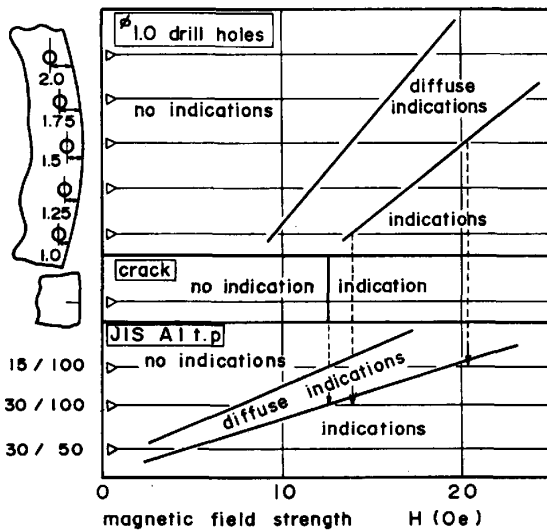


Fig. 8. Comparison of sensitivity among test pieces (continuous method).

Photo. 1 に示す。

4.2.2 鋼管における人工欠陥とA形標準試験片の対応

Fig. 8 は大径溶接管に埋め込んだ人工欠陥の横に JIS A 形標準試験片を貼付し、連続法により検出感度を比較した例である。クラックおよび深 1.0 mm のドリルホールが明瞭に検出される磁界の強さ H は JIS A1-30/100 のそれよりも大きい。従つて残留法において上記クラックと深 1.0 mm のドリルホールが検出できれば、連続法の JIS A1-30/100 以上の有効磁場の存在を直接保証したことにほかならない。同様に深 1.5 mm のドリルホールは JIS A1-15/100 を保証する人工欠陥である。

5. 考 察

磁界の拡散モデル計算によつて得られた「衝撃電流の通電回数ごとに、磁界が表層下深くまで拡散してゆく」という現象は、鋼材の B-H 特性から次のように説明できる。磁化電流により鋼材の磁化状態は 3.1 (2) に述べたように変化する。このとき一度磁化された部分の透

磁率は、全く磁化されていない部分に比べてかなり小さくなっているはずである (Fig. 2(b) 参照)。一方磁界の拡散は(1)式の τ に示すように、透磁率が小さいほど速くなる。そのため磁界は一度磁化された部分に対しては、非常に短時間で拡散し、通電時間の大部分は、より内部の磁化のために費される。これは通電回数ごとに繰り返されるため、磁界は表層下深くまで拡散する。

また、極肉厚管に対しても磁界は内外表面から拡散するので (Appendix 参照)、衝撃電流で外面側が磁化できないという説は誤りである。これについては、予備実験の衝撃電流磁化で、外面側のドリルホールが検出できることによつても裏付けられた。

6. 大径溶接鋼管の内外面磁粉探傷装置

以上述べた検討を基にして、大径溶接鋼管の内外面磁粉探傷装置を設備化したので、その概要を述べる。

6.1 特徴

- (1) 鋼管表面から内部への磁界の拡散と残留磁束密度分布の理論モデルによる推定に基づいた磁化電源装置設計。電源としては直流 (三相全波整流) を採用。
- (2) 将来大径溶接鋼管になりうる材質に対しても十分な残留磁束密度の得られる強力な磁界の強さ 80 Oe の採用。
- (3) JIS A 形標準試験片の検出感度と対応付けられた人工欠陥による合理的な残留磁気の確性方法の採用。
- (4) 磁粉液の大量循環回収装置の実用化。

6.2 設備概要

本装置の仕様を Table 1, レイアウトを Fig. 9, 磁化装置の概略図を Fig. 10 に示す。検査ラインに搬入された鋼管は電流貫通法で磁化された後、電極先端のノズルにより鋼管内面に磁粉散布が行われる。次に鋼管は内面検査・外面検査・洗浄・乾燥工程を経て手直しが行われ、搬出される。磁化電流は前述の人工欠陥を明瞭に検出する残留磁気を与えるように設定される。

7. 結 言

(1) 鋼材の磁粉探傷における磁化過程の理論モデルを確立し、JIS 解説などで言われている次のような経験則を理論的に説明できた。

- 1 衝撃電流磁化で通電回数を増すと検出性が良くなる。
- 2 直流電流の通電時間は 1/4~1s 必要。
- 3 磁界の強さは 80~100 Oe 必要。

(2) 従来明確でなかつた残留磁気の確性方法として、試験品に埋め込んだ人工欠陥による方法を確立した。この方法により、標準試験片よりも装置・磁粉液な

Table 1. Specification of the equipment.

Item	Specification
Large size pipe	Diameter 406~1625 mm Wall thickness 6.4~50.8 mm Length 5.5~18.6 mm
Magnetizing method	Threading bar method Max. 33 000 A
Inspection method	Wet residual method
Ability of flaw detection Rate	JIS A1 t. p. 30/100 compatible 35 pipes/h

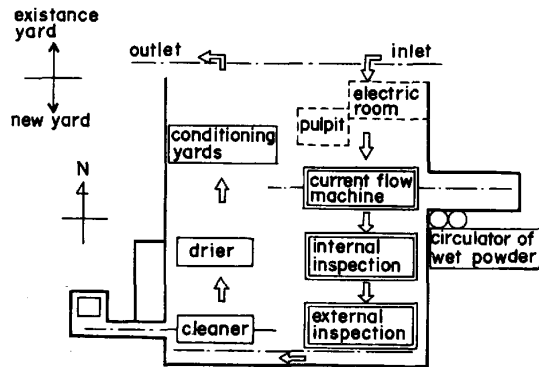


Fig. 9. Layout of entire surface magnetic particle flaw defector.

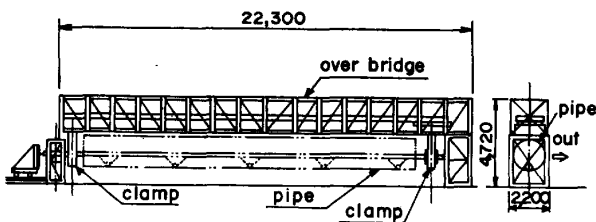


Fig. 10. Magnetizing machine.

どの性能および試験操作管理のレベルが次のような理由で向上した。

- 1 検出感度が一定。
 - 2 表層下の残留磁気の高さを直接確認できる。
- また、これらによつて多様化する製品ニーズにも十分に対応できると確信する。

(3) 上記理論モデルに基づき設備化した大径溶接鋼管の内外面磁粉探傷装置は、1983年6月より順調に稼動している。本稿では触れなかつたが、磁粉模様の自動検出を現在検討中である。

Appendix 磁界の強さの取り扱い

Fig. 2(a) のように鋼管を電流貫通法で磁化する場合、鋼管内面の表皮効果によつて外面側には磁界が存在せず

内面側からのみ磁界が拡散するという説があつた。しかし外面側にも磁界が存在することは、Ampère の法則により説明できる。鋼管の外側に閉曲線 C_2 をとると、常に $\oint_{C_2} H_2 \cdot ds = 2\pi r_2 H_2 = I + \int_0^{2\pi} \int_{R_1}^{R_2} J(r) dr d\theta$ が成り立つ。ここに $J(r)$ は渦電流密度である。第2項は鋼管部分を流れる渦電流による磁界への影響を表している。しかし、鋼管部分を流れる渦電流は、鋼管の内面側と外面側で方向が逆であるため、積分すると必ず「ゼロ」になる。従つて鋼管の外面側の磁界の強さ $H_2 = I/2\pi r_2$ となる。

このことは実験によつても確認できた。Fig. A は単相半波整流電流で磁化したとき、鋼管内外表面においたサーチコイルの誘起電圧を測定したものである。両コイルに同時に同じ大きさの電圧が誘導されている。

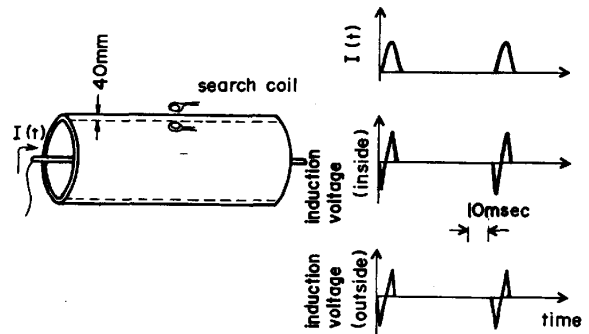


Fig. A. Comparison of induction voltage of inside search coil with outside.

文 献

- 1) JIS G-0565¹⁹⁸²: 鉄鋼材料の磁粉探傷試験方法及び欠陥磁粉模様の等級分類
- 2) ASTM E-709-80: Magnetic Particle Examination
- 3) MIL I-6868 E: Inspection Process, Magnetic Particle
- 4) DIN 54130: Magnetische Streufli β -Verfahren
- 5) 大越孝敬著, 二宮敬虔訳: 電気力学II (1970), p. 6 [産業図書]
- 6) 大西英明, 坪井 勇, 松村勝已, 石坂陽一: NDI 資料 3718 (昭和 57 年 9 月)
- 7) 大西英明, 坪井 勇, 松村勝已, 石坂陽一: NDI 資料 3700 (昭和 57 年 1 月)
- 8) 岡村弘之: 線形破壊力学入門 (1977), p. 218 [培風館]