

設備の健全性評価技術—鋼構造物の診断—

Evaluation Technology for Reliability of Equipments —Diagnosis Technology for Steel Structures—

片岡 経明 KATAOKA Noriaki JFE スチール 東日本製鉄所(千葉地区) 設備部保全技術室 主任部員(課長)
明智 吉弘 AKECHI Yoshihiro JFE スチール 東日本製鉄所(千葉地区) 設備部保全技術室 主任部員(副課長)
壁矢 和久 KABEYA Kazuhisa JFE 技研 機械研究部 主任研究員(課長)
境 禎明 SAKAI Yoshiaki ジャパンテクノメイト 技術部構造技術室 次長

要旨

近年、製鉄所において鋼構造物の老朽劣化が進行し、生産ラインの重大故障回避あるいは、設備の保守・老朽更新時期の適正化などが課題となっている。JFE グループでは、さまざまな劣化診断技術の開発に成功し、製品の安定供給や設備の長寿命化を実現している。本稿では、コンベアフレームを対象とした開発事例を紹介する。

Abstract:

Recently, aging of steel structures such as conveyor frames has become a big issue in steelmaking works. It may lead to fatal breakdown of production lines and the increase of maintenance and renovation cost. JFE Group has successfully developed various new diagnosis technologies that enable the group to assess and maintain the steel structures properly. They have greatly contributed to the steady delivery of the products, and extended the life of equipment in the steelworks. This paper introduces their typical examples.

1. はじめに

鉄鋼業は、1960 年代の高度成長にともなう内外需要の増大に支えられて、この時期に多くの建設が実施されたため、老朽化している設備も少なくない。JFE スチールにおいても、建設後 30 年以上経過している鋼構造物も多く、安全・安心という観点から、健全性の評価が重要な課題となっている。また、重大故障回避のため保守・老朽更新範囲は拡大傾向にある。中でも総機長 100 km 以上に達する原料搬送コンベアは広範囲な保守・更新を行っている。コンベアの中には高炉装入コンベアのように、その故障が生産に重大な影響を及ぼす設備も多いため、安易な保守・更新時期の先送りは許されない。JFE グループでは、設備強度の定量的な評価による適切な更新実施のため、劣化診断技術開発を行っている。

本稿では、鋼構造物の健全性評価技術を開発・適用した事例としてコンベアフレームを取り上げ、固有振動数測定法(スパン全体の剛性評価)および磁歪応力測定法(フレーム局部の応力評価)による劣化診断について紹介する。

2. 固有振動数測定に基づく鋼構造物の劣化診断

一般的なコンベアは、溝形鋼や山形鋼で構成されるトラスフレームの上に、ローラー・ベルトなどの搬送部を有しているが、設備によってはフレーム部の腐食減肉にともなう強度低下により、補修や更新に至っている。

しかし、従来はその判断を保全員の目視(一部残厚測定)による主観的判定に依存していたため、客観的かつ定量的な評価が可能な技術が望まれていた。本章では、これを実現すべく開発した固有振動数測定に基づく鋼構造物劣化診断技術: DASH-V (damage assessment and structural health monitoring by vibration measurement) について述べる。

2.1 基本原理

構造物の振動測定に基づく劣化診断技術については過去にも多くの報告がある。固有振動数や減衰比、モード形などのモーダルパラメータに着目するのが一般的で、Adams ら¹⁾は剛性の低下や減衰の増大で構造物の損傷検知が可能

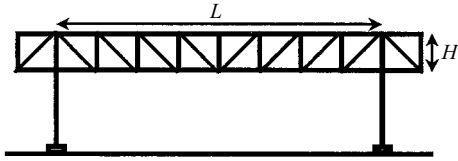


Fig.1 Side view of conveyor frame

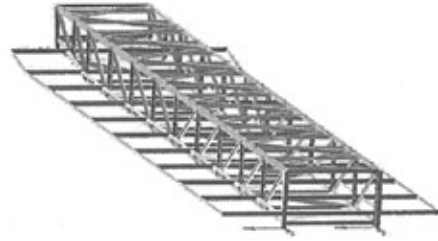


Fig.2 FEM model of conveyor frame

であるとしている。Aktan ら²⁾ は橋梁の健全性評価への応用を示している。しかし、これらは基本的に健全状態からの相対的变化で評価をするので、(1) 健全時のデータが必要、(2) 絶対評価が困難という問題があった。

鋼構造物の腐食減肉にともなう劣化診断の理想は、部材にかかる最大応力値を求め、それが許容範囲内か否かで定量的に絶対評価することである。そこで著者らは構造物の固有振動数から最大応力値を推定する手法を検討した。

前述のとおりトラスで構成されているコンベアフレーム (Fig. 1) の1スパンを仮に断面 (矩形) 一様の両端単純支持梁とみなすと、自重による最大曲げ応力 σ_{max} は (1) 式、1次曲げ固有振動数 f_1 は (2) 式で与えられる。ここで、 L : スパン長、 H : フレーム高さ、 ρ : 密度、 E : ヤング率である。

$$\sigma_{max} = \frac{3\rho L^2}{H} \dots\dots\dots (1)$$

$$f_1 = \frac{\pi H}{4L^2} \sqrt{\frac{E}{3\rho}} \dots\dots\dots (2)$$

(1)、(2) 式より、 σ_{max} と f_1 の関係として、(3) 式が導かれる。

$$\sigma_{max} = \frac{\pi^2 E H}{16 f_1^2 L^2} \dots\dots\dots (3)$$

実際のコンベアフレームは断面一様でないので、(3) 式をそのまま適用することはできないが、既知であるスパン長とフレーム高さに加え、固有振動数が分かれば、最大応力値を推定できることを示している。これが固有振動数測定に基づく鋼構造物劣化診断の基本原則である。

2.2 コンベアフレーム劣化診断への適用

前節の基本原則が実際のコンベアフレームに適用可能かの検証は FEM (有限要素法) 解析に基づいて行うこととした。Fig. 2 はトラス構造を梁要素、ベルトや搬送物などを付加質量で構成した FEM モデルで、実機を忠実に再現したものである。この FEM モデルの妥当性は、実機加振実験による 1 次曲げモード固有振動数測定と FEM 固有値解析との比較により確認した。Table 1 は実機コンベアフレームの腐食減肉にともなう劣化更新の前後における加振実験

Table 1 Verification of FEM model (First bending mode natural frequency)

	Experimental (Excitation)	Numerical (FEM)
Damaged (Before Renewal)	5.2	5.3
Refreshed (After Renewal)	5.6	5.6

(Hz)

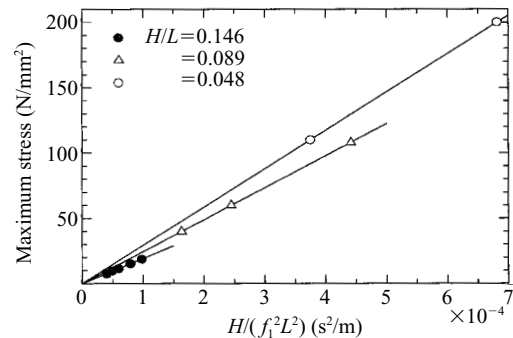


Fig.3 Maximum stress computed by FEM analysis

とそれに対応する FEM 解析 (肉厚実測値入力) の結果で、両者は良好に一致している。

妥当性が証明された前述モデルにおいて、スパン長 L 、フレーム高さ H と部材肉厚をパラメトリックに変化させ、FEM 静解析によって部材にかかる最大応力値を求めた結果を Fig. 3 に示す。(3) 式に基づいて横軸に $H/(f_1^2 L^2)$ をとると、 H/L が一定の場合、最大応力値 σ_{max} は $H/(f_1^2 L^2)$ に比例していることが分かる。すなわち、断面一様両端単純支持梁の基礎理論から導かれる前節の基本原則が、実際のコンベアフレームに適用可能なことが立証された。

以上より、コンベアフレームの 1 次曲げ固有振動数を測定できれば、その状態において部材にかかる最大応力値を算出でき、これと許容応力値を比較評価することで、コンベアフレームの定量的劣化診断を実現できる。

2.3 まとめ

著者らは、鋼構造物のある特定の振動モードの固有振動数から、部材にかかる最大応力値を推定し、健全時のデータを必要とすることなく、腐食減肉による老朽劣化度を客観的かつ定量的に評価する鋼構造物劣化診断技術 DASH-V を開発した。本技術は、すでに実用に供しており、(1) 安

全確保と安定操業保証、(2) 突発的重大故障による機会損失の防止、(3) 更新範囲の厳選および補強延命の拡大による保守・更新方法の適正化に大きく貢献している。

3. 磁歪応力測定法

維持管理の観点から構造物の安全性を評価するには、応力状態を知ることが有効である。構造物に対する応力測定ではひずみゲージ法によるものが一般的であるが、既設構造物の応力状態をひずみゲージ法で測定するためには、応力解放作業をともなった、いわゆる破壊検査によらないと難しい。しかしながら、供用下の構造物の多くは、このような破壊検査を行うことは不可能であり、おのずとその適用範囲は限られていた。

以上のような背景から、著者らは現場の構造物を非破壊的に、かつ簡便に測定・評価できる手法として、磁気異方性を利用した応力測定法（以下、磁歪法）に着目し、その利用技術を開発してきた。

本章ではその概要と展望について紹介する。

3.1 測定原理

磁歪法では Fig. 4 に示すような磁気異方性センサ（以下磁歪センサ）を測定対象物上において測定する。いま、Fig. 4 に示すような応力状態にセンサがおかれている場合の動作原理を説明する。被測定物の透磁率とよばれる磁気的な性質は、引張応力方向に僅かに大きくなり、磁気的な異方性が生じる。このとき、コア E に巻いたコイルに電流を流すと、センサの足 E₁ から出た磁束のうち大部分は最短距離で直接 E₂ へ向かうが、E₁D₁ 間および D₂E₂ 間は E₁D₂ 間及び D₁E₂ 間に比べて透磁率が $\mu_x - \mu_y$ だけ大きいために、一部は矢印で示す様にコア D の中を流れる。

以上の磁気回路を交流磁界で形成すると、コア D に巻いたコイルには誘導電流が流れ、ある電圧が生じることになる。

この電圧 V は、

$$V = K_0 \cdot (\mu_x - \mu_y) \dots\dots\dots (4)$$

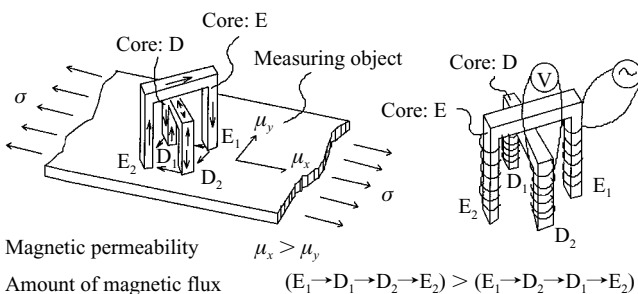


Fig. 4 Principle of magnetic anisotropy sensor

ただし、 K_0 ：励磁条件，コイルの条件，材料の磁気的特性などにより定まる定数と表すことができる。

透磁率の異方性 $\mu_x - \mu_y$ は直交する 2 軸の応力差 $\sigma_x - \sigma_y$ に比例するため、結果として (1)式は、

$$V = K \cdot (\sigma_x - \sigma_y) \dots\dots\dots (5)$$

ただし、 K ：励磁条件，コイルの条件，材料の磁気的特性などにより定まる定数と書き換えることができる。したがって、比例定数にあたる K （以下、磁歪感度）が分かれば、磁歪センサの出力によって応力差を求めることができる。

なお原理上、センサを測定対象物上で回転させたときの出力は 180° 周期の正弦波状のものとなり、最大になる方向が最大主応力方向となる。このとき測定対象の応力が 1 軸応力場、もしくは 1 軸応力場に近い場合には、近似的に主応力が測定されることになるが、2 軸応力場の場合は光弾性応力測定分野で利用される「せん断応力差積分法」を用いて主応力差を分離する³⁾。

また、磁歪センサで求められる応力はその原理から、絶対的な応力、すなわち残留応力成分と負荷応力成分の総和が測定されることになる。

3.2 磁歪応力測定システム

磁歪法は上記のような測定原理によるが、実際の構造物の応力を簡便に測定・評価するためのシステムを開発した。本システムの外観を Photo 1 に示す。

磁歪センサは小型のセンサヘッドに組み込まれており超小型モータによって回転し、自動的に主応力方向を求めるようになっている。また一般に磁歪感度はリフトオフと呼ばれる磁歪センサと鋼材との距離によって変化するが、磁歪センサのなかにこのリフトオフを検出する機構を組み込むことによって、リフトオフに応じた磁歪感度の補正を行っている。したがって、未知の膜厚をもつ塗装、塗覆装の上からも精度よく測定することができる。計測器本体とセン



Photo 1 Stress measurement system using magnetic anisotropy sensor



Photo 2 Stress measurement using the system

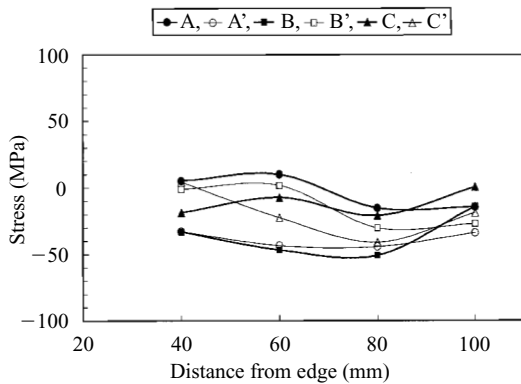


Fig.5 Axial stress distribution of upper frame

サヘッドは30mのケーブルで接続され、現場での機動性を考慮している。これらの処理はノート型パソコンによって対話形式で集中的に処理され、初心者でも容易に扱えるようになっている。

3.3 コンベアフレームへの適用事例

ここでは、製鉄所内コンベアフレームの応力測定の実例を紹介する。対象はスパン25mのコンベアフレームで150mmの等辺アングルにて、構成されている。測定時の状況をPhoto 2に示す。

Fig. 5は、上弦材各部材の長手方向の応力を示したものであるが、幅方向に均一な応力分布が測定されており、本測定部位では健全な応力状態であることが確認された。

本稿では、コンベアへの適用について紹介したが、アンローダークレーンなどの他の鋼構造物にも本技術を適用している。

3.4 まとめ

磁歪法は装置が小型軽量で、非常に簡便に測定できると

いう特徴がある。本稿では鋼構造物を対象としたシステムについて紹介したが、このほかにパイプラインの曲げ応力や扁平応力を測定・評価するシステムも開発しており⁴⁾、すでにパイプラインの維持管理の分野で数多く利用されている。

4. おわりに

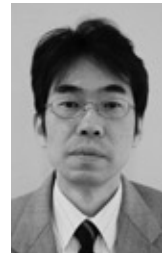
本稿では、鋼構造物の健全性評価に関するJFEグループ開発技術の一例を紹介した。JFEスチールの各製鉄所では、これらの開発技術を組み合わせて有効活用することにより、設備強度の定量的な評価による適切な更新を行い、鋼構造物の重大故障防止を図っている。

参考文献

- 1) Adams, R. D.; Cawley, P.; Pye, C. J.; Stone, B. J. A vibration technique for non-destructively assessing the integrity of structures. J. of Mechanical Eng. Sci. vol. 20, no. 2, 1978, p.93-100.
- 2) Aktan, A. E.; Brown, D. L.; Farrar, C. R.; Helmicki, A.; Hunt, V.; Yao, J. "Objective global condition assessment." Proc. of the 15th Int. Modal Analysis Conf. Orlando, FL, 1997, p. 364-373.
- 3) 安福精一. 磁気プローブによる溶接部残留応力の解析. 第16回応力・ひずみ測定シンポジウム. 1984, p. 1-10.
- 4) 境禎明ほか. 磁気異方性を利用した鋼管応力測定・評価技術. JFE技報. no. 3. 2004, p. 42-47.



片岡 経明



明智 吉弘



壁矢 和久



境 禎明