

36. 歪み計測による疲労劣化検知技術の紹介と適用事例

株式会社 IMC
株式会社 IMC
株式会社 IHI

○ 小林 大祐
柴田 勝規
宮崎 信弥

1. はじめに

わが国では長きにわたる経済成長の鈍化により、高度成長期に整備された社会インフラが更新時期を迎えてもなお使われ続けようとしている。また、比較的新しい施設においても、左記影響によって維持管理コストを可能な限り抑えることが日常化しており、必ずしも十分な保守を受けているとは言いがたいケースが見受けられる。本論文で紹介する手法は、このような社会背景において各種構造物の損傷を、高費用対効果かつ高精度に自動監視するために開発したものである。複数のセンサによる計測値の同一性検定を行うことで、従来の手法よりも微小な損傷を簡易な計測によって検出することができる。

本論文では具体的な手法の解説と実際の設備への適用事例、そこで実際に疲労き裂を検出した事例を紹介する。東日本大震災以来、大規模震災への備えが叫ばれて久しく、前述のように老朽インフラが多数残る状況は非常に大きなリスクを抱えていると言えるが、本手法を用いることで、そのリスクを軽減できるものと考えている。

2. 歪み計測による疲労劣化検知技術

本手法は対象構造物に設置した複数の歪みセンサの計測値に対して、SI-F 法による分析を適用することによって疲労劣化を検知するものである。SI-F 法とは、東京工業大学の轟研究室により提案された、統計的手法による検知技術である。

従来の異常検知では、図-1 に示す通り、個々のセンサデータにしきい値を設け、個々にしきい値を越えたか否かで良否判定を行っていた。この方法では外乱（温度変化、荷重変化など）によって、特に問題が無くてもしきい値を超える場合があり、誤った診断を行うことが多かった。また、誤診断を防ぐためにしきい値を緩めに設定すると異常検知精度が下がり、真の異常発生を見逃してしまう危険性がある。

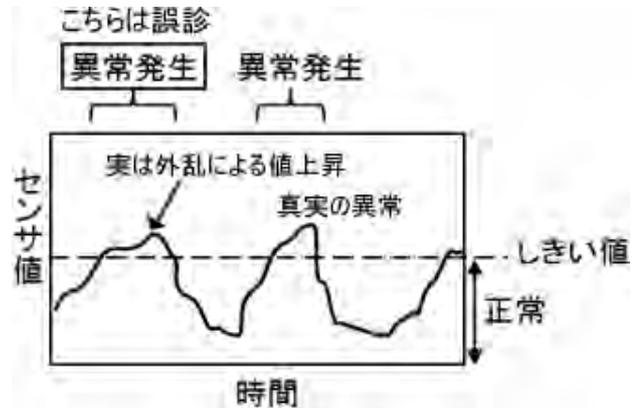


図-1 従来の異常検知技術

これを防ぐためには、図-2 に示す通り、複数のセンサデータの相関関係に着目して、その変化により異常発生を判定することが有効である。複数のセンサデータの相関関係は、温度変化や荷重変化といった外乱の影響を受けにくいいため、誤診断の回避と高精度化の両立が可能になる。

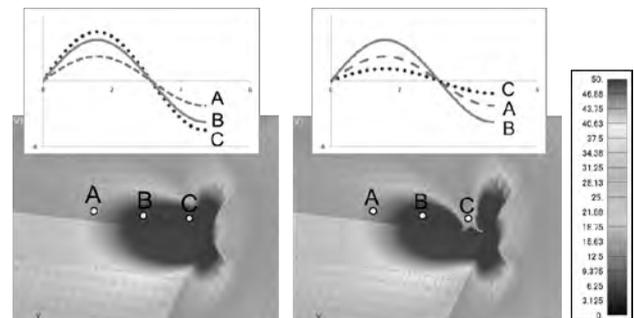


図-2 SI-F 法 異常検知技術³⁾

SI-F 法では、正常な時の相関関係に対して、診断時の相関関係が同一とみなせるか否かを判定し、同一とみなせない場合に異常発生と診断する。その判定には、データ同士の同等性を検定する統計的手法である、F 検定を用いる。算出された F 値は外乱の影響を受けにくく、値が大きいほど異常度が高いことを示す単一の数値であるため、しきい値を設けて自動診断が可能である。

3. 適用事例

前章で紹介した手法は、既に複数の鉄鋼構造物（コンテナクレーン、船舶等）に適用しており、そのうちの 1 例において実際にき裂を検知したので紹介する。

紹介事例は、2 本の支柱の溶接部にき裂が発生したものであり、以前より同箇所は構造的に脆弱であることが懸念されていたが、日常的な点検が困難な場所であるため、本手法を適用して、き裂の発生を監視していたものである。

後述するように、溶接部の前後に、各 2 枚ずつ歪みセンサを設置している。以後は便宜的に前側を A、後側を B とし、それぞれ前側、後側のき裂発生を監視している。

(1)対象位置 A

①歪み計測開始時

図-3 のように、溶接継ぎ手部の応力が集中する位置に歪みセンサ a、b を設置した。

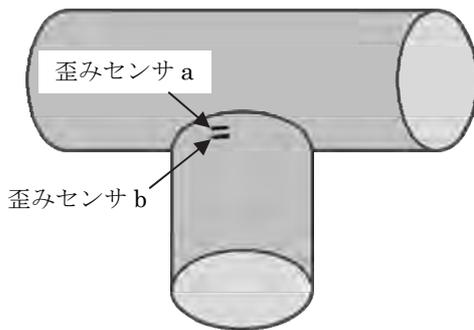


図-3 歪み計測開始時の位置 A

設置した歪みセンサ a および b の間の距離は、30mm である。(図-4)

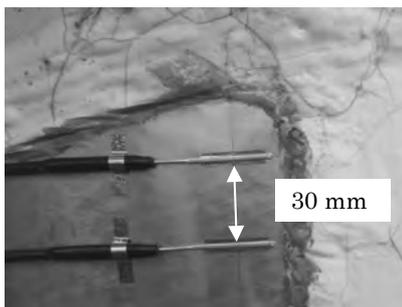


図-4 歪みセンサ a および b

②計測開始 3ヶ月後

図-5 に示す位置に 20mm 程度のき裂を目視確認した。き裂位置は、歪みセンサ a から約 100mm の位置で発生している。実際に発生したき裂の状態を図-6 に示す。

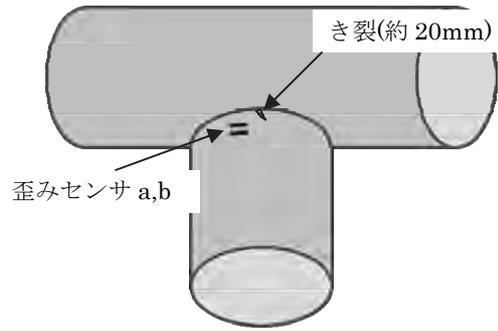


図-5 歪み計測開始約 3ヶ月後の位置 A

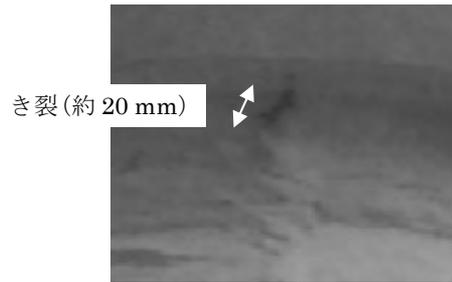


図-6 歪み計測開始約 3ヶ月後、位置 A で発生したき裂

この時の位置 A における歪みデータの F 検定処理結果を図-7 に示す。後半に、F 値が急上昇している（歪みセンサ a、b の相関関係が崩れている）のが確認できるが、この時にき裂が発生したと思われる。

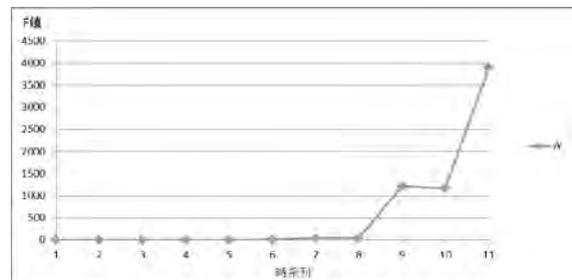


図-7 歪み計測開始約 3ヶ月後の位置 A における F 値

③計測開始 6ヶ月後

図-8 に示すとおり、き裂は約 90mm まで進展した。結果き裂はセンサまで約 40mm の位置に迫っている。

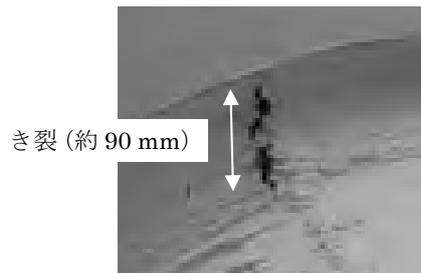


図-8 歪み計測開始約 6ヶ月後、位置 A で発生したき裂

この時期の F 値のグラフを図-9 に示す。3 ヶ月後と比べて F 値自体が大きく、より長く値が高い状態が続いている。これはき裂が約 20mm から約 90mm まで進展する過程に伴うものと考えられ、F 値が大きくなっているのは、き裂の進展速度自体が増しているためと推測される。

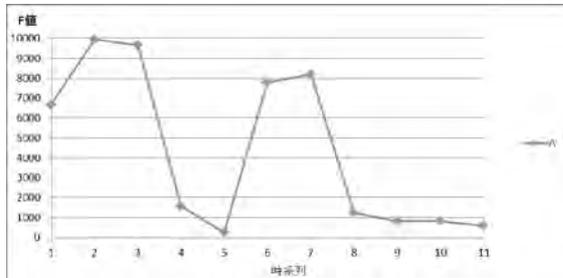


図-9 歪み計測開始約 6 ヶ月後の位置 A での F 値

(2)対象位置 B

①歪み計測開始時

位置 A と同様に、溶接継ぎ手部の応力が集中する位置に歪みセンサ c, d を設置した。(図-10) 歪みセンサ c と d の間の距離は、30mm である。

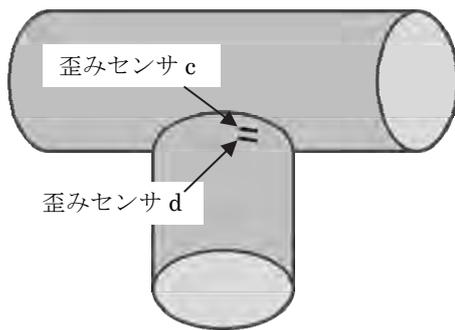


図-10 歪み計測開始時の位置 B

②計測開始 3 ヶ月後

位置 B においてき裂等の異常を目視確認することはできなかったが、図-11 に示すように、この時期に歪みセンサ c, d に基づく F 値のグラフを見ると、後半に小さな値の上昇を検知している。これは後に位置 B において目視確認されるき裂の発生初期を捉えたものと考えられる。

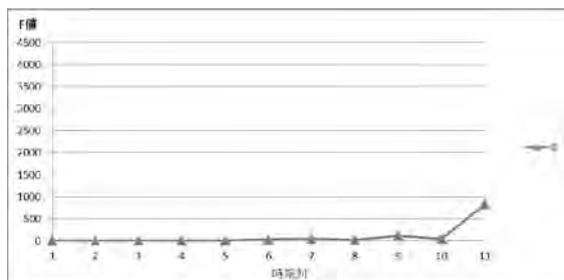


図-11 歪み計測開始約 3 ヶ月後の位置 B での F 値

③計測開始 6 ヶ月後

き裂発生は目視確認できなかったが、図-12 に示す位置に 15mm 程度の錆が発生していることを確認した。実際に発生した錆の状態を図-13 に示す。錆は歪みセンサ c から約 120mm の位置で発生している。

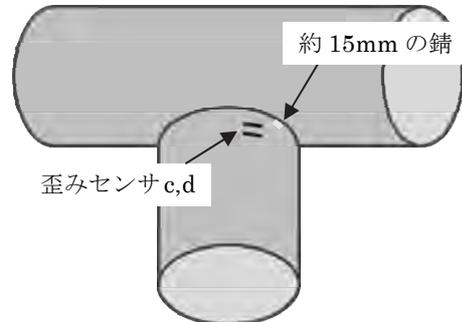


図-12 歪み計測開始約 6 ヶ月後の位置 B

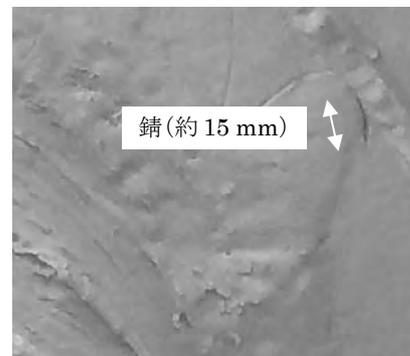


図-13 歪み計測開始約 6 ヶ月後、位置 B で発生した錆

上記時期における F 値のグラフを図-15 に示す。これを見ると F 値の変動は検知されておらず、前述の通り、錆の発生を目視確認したものの、この期間におけるき裂の進展はない、または微小であったものと思われる。

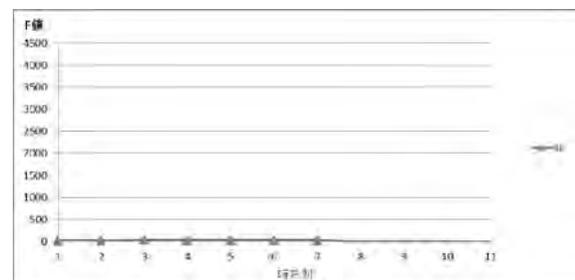


図-14 歪み計測開始約半年後の位置 B での F 値

④計測開始 10 ヶ月後

図-12 で示した発錆箇所新たにき裂が生じているのを確認した。よって計測開始 3 ヶ月後に検出した F 値上昇は、ここで確認されたき裂の発生初期段階によるものと考えて間違いのないと思われる。

位置Bで発生したき裂の写真を図-15に示す。

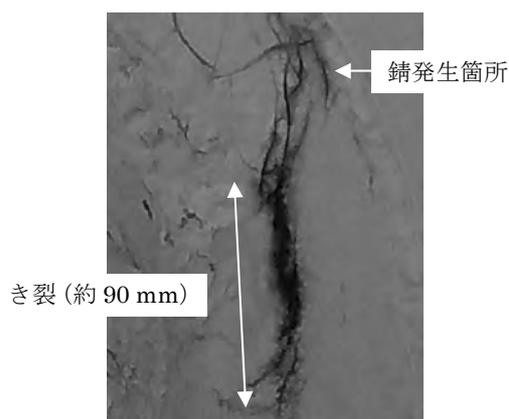


図-15 歪み計測開始約10ヶ月後、位置Bで発生したき裂

4. 結果の評価

前章に示したとおり位置Aにおいては、き裂の発生及び進展に伴いF値の大きな変動を検出しており、本手法によるき裂検出性能が、実運用においても期待通り発揮されることが確認された。

また、位置Bにおいては、塗装によって覆い隠された発生初期段階の微小き裂によると思われる兆候も捉えており、本手法におけるき裂の検出性能が十分に高く、かつ構造的に重要な部分のき裂監視にも適用可能であることが確認された。

5. 今後の課題

①F値のしきい値の設定

適用事例の位置Aでは、F値のかなり大きな値を検出したため、異常値であることが分かりやすかったが、位置Bでは、小さなピーク値のみが検出されたため、このピーク値は異常値なのか、それとも一時的な値であるかの判断が難しかった。よって、今後はより事例を重ね、F値のしきい値として適切な値、またはF値を定める基準式を設定し、特別なノウハウを有しなくても本手法による診断が行えるようにする必要がある。

②歪みセンサの異常検出範囲

今回の適用事例では、両事例ともに歪みセンサの近傍でき裂が発生したため、非常に良好な検出性能を発揮できたが、実際にどの程度の距離まで有効な検知が可能か、検証していく必要がある。

また、今回の適用事例では予め構造的に脆弱な箇所が判っていたため、あえて歪みセンサ間の距離を30mmと狭くすることで検出性能を向上させていたが、その代償として検出可能範囲が小さくなっている。今回のように監視すべき範囲が比較的小範囲に限定できる場合はこれで良いが、どこにき裂が発生するか特定が難しい場合、紹介事例のような30mm間隔での設置では、非常に多くの歪みセンサを各所に設置しなければならず、効率が

悪い。よって、より広範囲に監視するためのセンサ間隔及び配置の検討を進めるとともに、監視目的に見合ったセンサ配置を決めるための基準、方法の検討を行う必要がある。

6. おわりに

今回紹介した歪み計測による疲労劣化検知手法は、鉄鋼構造物やコンクリート構造物であれば適用することができる汎用性のある技術である。前述のとおり、少なくとも適切にセンサを配置すれば、き裂の発生を初期段階で検出することが可能である。これは特に、日常的に点検や補修を行うことが難しい高所、水中、閉鎖空間や酸欠環境など（橋梁の支承や主桁の裏側、船舶のバラスタタンク内等）における構造物の維持管理において非常に有効な手法であると考えている。また、本手法による監視はコンピュータによる自動監視が可能であるため、多くのインフラを集中して少ない人員で管理することが可能となる。これらのことから、本手法は今後増加の一途をたどる老朽インフラの維持管理において、その合理化と高精度化を同時にもたらすことが可能であると考えている。

- 1) 柴田勝規・宮崎信弥・戸村雅一：作業船における予知保全技術と適用事例紹介，建設機械施工 Vol.66, No.8 August 2014
- 2) 宮崎信弥：老朽化インフラの声なき悲鳴をキャッチ，IHI 技報, Vol.54, No.2, 2014
- 3) 財団法人 機械システム振興協会，機械システム等の疲労劣化診断モニタリング技術の開発に関するフィージビリティスタディ報告書（2009）