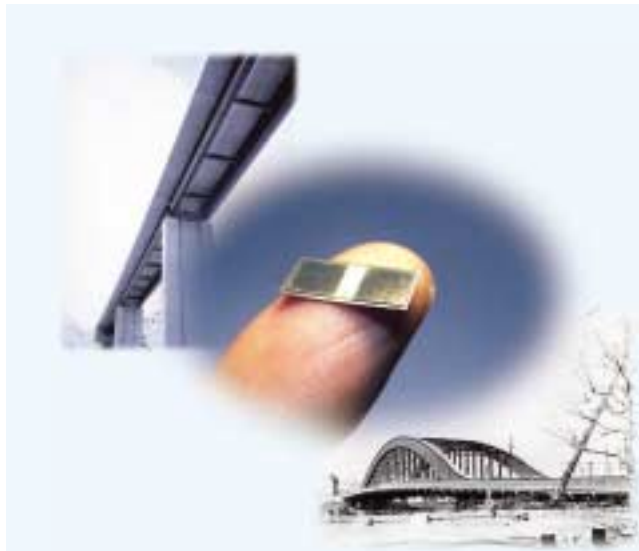


# 橋梁の建設からメンテナンスへ - 橋梁診断技術 -

## From Bridge Construction to Maintenance - New Bridge Diagnostic Technology -



川口 喜史 *	Yoshifumi Kawaguchi
大垣 賀津雄 *	Kazuo Ohgaki
阿部 和浩	Kazuhiro Abe
上野 善彦	Yoshihiko Ueno
仁瓶 寛太	Kanta Nihei
村岸 治	Osamu Muragishi
小林 朋平	Tomohei Kobayashi
高島 顕	Akira Takashima
岩崎 勇人	Hayato Iwasaki

当社の橋梁建設は我が国の「鉄の橋」の歴史とともに1世紀を越えて歩んできた。これらの数多くのストック（資産）は高齢化を迎え、効率的かつ計画的な維持管理・長寿命化が求められている。本稿では、鋼橋の疲労および腐食に関する診断技術である「疲労センサ」と「腐食環境センサ」について述べる。さらに、補修・補強の効果的な技術の一例として、腐食部への「カーボンエイド」適用について述べる。

Infrastructure ages quickly, therefore Diagnostic Technologies for efficient and planned maintenance management are needed. This paper introduces Diagnostic Technologies for fatigue and corrosion, which are typical forms of degradation and damage seen in steel bridges. Specifically, it presents Fatigue Detecting Sensor and Atmosphere Corrosion Sensor. Carbon-Aid is explained as an example of an effective technology for repair and reinforcement.

### まえがき

橋梁の建設が大量に行われてから30年以上が経過し、劣化や疲労に起因する損傷や事故が顕在化しつつある。しかも、我が国の社会基盤整備は、高度経済成長期に急速におこなわれてきたため、これらの事象発生は諸外国に例を見ないスピードで増大することが予測されている。このため、今後は適切な補修による橋梁の延命化や、補修・更新費用の平準化・最小化を図ることが必要とされている。近年では構造物のアセットマネジメントの導入が検討されつつある。これは、構造物を資産としてとらえ、構造物の状態を把握して客観的に評価し、中長期的な資産の状態を予測するとともに、予算的制約の中でいつどのような対策をどこに行うのが最適であるかを考慮して、構造物を計画的かつ効率的に管理することである。

本稿では予防保全に寄与できる健全度評価や劣化予測の診断技術として、「疲労センサ」による余寿命診断および「腐食環境センサ」による劣化予測の技術開発と適用事例を紹介する。またこれら腐食などの損傷補修に効果的な炭素繊維シートを用いた補修補強工法の技術についても述べる。

### 1 橋梁建設の変遷とメンテナンスへの転換

#### (1) 橋梁建設の黎明から発展

当社の橋梁建設の歴史は1887年から始まり、我が国の「鉄の橋」の歴史とともに歩み、1世紀を越えている。鉄

構・造船で培ってきた溶接技術をもとに、数々のエポック橋梁を手がけてきている。以下に、一例を紹介する。橋梁に初めて高張力鋼を採用した「永代橋（1926年）」をはじめとする隅田川の「清洲橋」、「白鬚橋」、「勝鬨橋」のほか、我が国初の全断面溶接桁として当時、世界最大の支間53mの「田端跨線橋（1935年）（田端ふれあい大橋：現在は歩道橋）」などがある。1972年に当社と合併した汽車製造(株)においても70余年にわたって多くの鉄道橋・道路橋を手がけている。北海道旭川のシンボル「旭橋（1932年）」や、現在も「銀橋」と呼ばれて市民に親しまれている大阪市の「桜宮橋（1930年）」はその代表である。これらの高い技術はその後川崎重工(株)として引き継がれ、大きく成長させてきた。

近年では、高度経済成長とともに数多くの各種橋梁の製作・建設を手がけ、本州四国連絡橋をはじめとする長大橋梁、さらには建設費のコスト縮減に対応した合理化橋梁などの技術開発に貢献してきている。

#### (2) メンテナンス、長寿命化の時代

当社では約3,000橋におよぶ膨大な自社製作と建設した橋梁のカルテからなるデータベースを構築している。これらをもとにして、補修レベルとその優先順位を決定するに際して、合理的なシステムと明確な判断基準が求められている。メンテナンスとは調査・点検に始まり、橋梁が保有している性能が要求レベルを下回っているかどうかを評価・判定し、劣化予測をおこない、適切な対策を立案し実

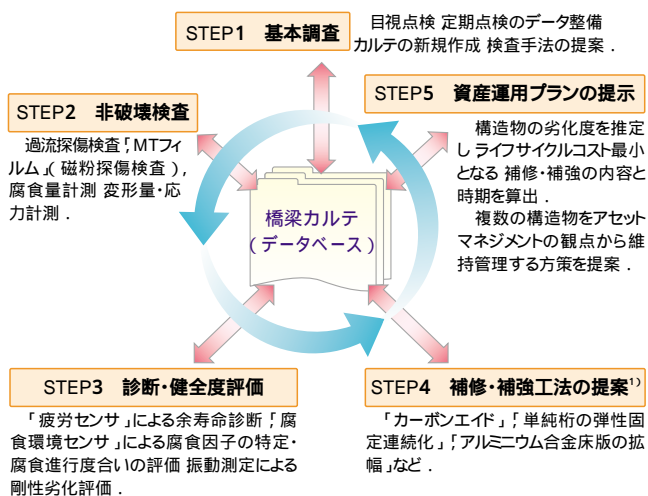


図1 ウェルネスプラン  
Fig. 1 Wellness Plan

行することである。そして、健全度評価、劣化予測などに結びつけるための定量的なデータに基づく診断が求められている。あわせて効果的な補修・補強技術<sup>1)</sup>も求められている。これに対して、当社ではウェルネス・プラン(図1)と称して、各ステップでの単独およびトータルとして技術サービスの提供をおこなっている。

ウェルネス・プランとは、橋梁などインフラ構造物の健全度状態(ウェルネス)をチェックし、構造物の補修・補強計画を含めた資産運用プランを提示するものである。

これは、社会基盤施設を取り巻く環境やこれからのあり方を踏まえて、予防保全に基づく長寿命化を図ることを目的としている。この背景には、総合重工業としての船舶など他製品やプラント・設備において取り組まれてきた維持管理および診断に関する要素技術があり、これを社会資本構造物である橋梁へ展開するものである。

## 2 「疲労センサ」による余寿命診断

### (1) 「疲労センサ」による鋼橋余寿命診断技術

橋梁に代表される鋼構造物は、長寿命化を図ることが求められている。損傷に対しては、目視、磁粉探傷、浸透探傷、超音波探傷や高機能な計測装置による点検や検査が必要であり、その調査・診断結果によっては延命策として補修や補強が行われている。これらの検査法は通常、き裂・腐食・変形などの異常を見つけ出す事後保全的なものであり、き裂など将来発生しうる欠陥を予測する予防保全的なものではない。もし疲労き裂損傷の発生時期が事前に予測できるのであれば、小規模の補修・補強で十分であったり、定期的検査の間隔を延ばせるなど、コストの削減を期待できる。ひずみゲージによる応力頻度測定に基づく従来の余寿命診断手法では、測定点数や期間に限界があったり、膨大なデータを処理する必要があった。

当社で開発した「疲労センサ(図2)」は、繰返し荷重を受ける溶接接合部近傍に貼付することで当該部の疲労損傷度を推定する金属箔状の犠牲試験片型ゲージである<sup>2)</sup>。

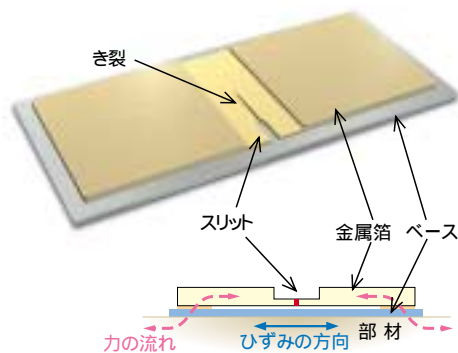


図2 「疲労センサ」  
Fig. 2 "Fatigue Detecting Sensor"

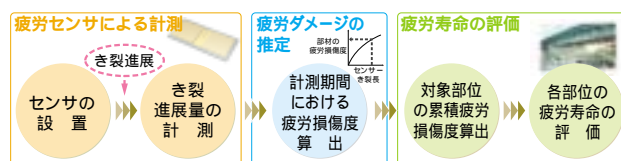


図3 「疲労センサ」による鋼橋の疲労余寿命診断フロー  
Fig. 3 Flow of fatigue life evaluation using "FDS"

図3に示す手順で、供用中の橋梁にセンサを一定期間(数ヶ月)貼付し、その間に検出したセンサのき裂長さから構造部位の余寿命を推定するものである。

### (2) 従来の応力頻度計測との比較

橋梁の構造ディテールを設けたプレートガーダー模型供試体を用い、「疲労センサ」の余寿命診断性能の実証疲労試験をおこなった。応力集中部でのき裂発生時期を、ひずみゲージによる従来法と「疲労センサ」とで推定し、同等の結果を得た<sup>3)</sup>。き裂発生を浸透探傷試験とひずみ振幅の低下率で確認した。図4に示すように、「疲労センサ」はひずみゲージと同等にかつ正確にき裂発生時期を予測できた。

また、供用下の橋梁において、「疲労センサ」(6ヶ月間)とひずみゲージによる頻度計測(3日間)にて、両者による疲労寿命の推定比較を実施した結果を図5に示す。両者は満足の行く相関を示し、「疲労センサ」による余寿命診断が妥当であることが確認できた<sup>4)</sup>。



図4 プレートガーダー実証試験の結果  
Fig. 4 Fatigue crack prediction and actual generation

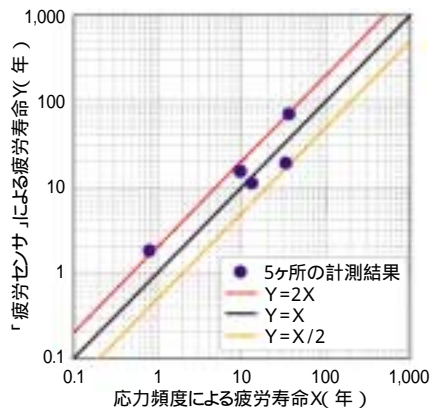


図5 実橋での従来法と「疲労センサ」の比較  
Fig. 5 Comparison of conventional method and "FDS" on a bridge

(3) 疲労損傷の余寿命予測と補強効果の定量化

当社は、全国の道路橋や鉄道橋において、500枚を超える「疲労センサ」の適用実績を有している。

現在では、鋼橋における対象部位の疲労余寿命を算出するほか、構造体の補修・補強に対する効果の定量化にも「疲労センサ」が用いられている。

3 「腐食環境センサ」による劣化診断

(1) 「腐食環境センサ」による腐食因子特定の技術

大気中に置かれた鋼構造物の腐食の原因は、水分(結露、雨水)、飛来塩分、大気汚染物質、風、温度などの複合されたものであるが、気象因子の単独分析では腐食との対応は困難である。また、合理的な防食設計を行うためにも、付着塩分量、硫酸化物、温度・湿度などの腐食環境因子と腐食状態(形態、部位、速度)との定量的な関係を明らかにする必要がある。

そこで、金属の変色(状態変化)を利用することで腐食要因を容易に特定する「腐食環境センサ」を開発した<sup>5)6)</sup>。大気腐食にて変色しやすい数種類の純金属板(30×30mm)を非電導材ベースに埋め込んだ構造である(図6)。このベース裏面はマグネット式になっており、鋼構造物のあらゆる部位で簡単に設置・回収を行うことが可能な構造である。図6は通常の大気環境下で変色しやすい金属(Mg, Ag, Al, Cu)およびFeを用いたものである。

「腐食環境センサ」は以下のような特長を有する。

長期間を要する鋼材の大気暴露試験に比べ、数ヶ月の短時間で腐食状況を簡易に知ることができる。

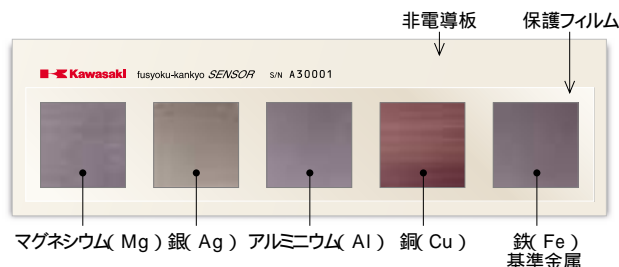


図6 「腐食環境センサ」  
Fig. 6 "Atmosphere Corrosion Sensor"

複数の金属の分析評価から、複合的な要因で生じる腐食も一度に推定することが可能となる。

従来の測定計器での気象因子単独分析は高費用で、腐食との対応も困難であるという問題点を解決することができる。

(2) 「腐食環境センサ」を用いた劣化予測

(i) 分析・評価の手順と橋梁への適用

「腐食環境センサ」を用いた鋼構造物の腐食環境の分析と評価の手順は、次の通りである。

まず、鋼構造物の測定対象部位にセンサを設置して、現地に数ヶ月間放置しておく。この間に外界環境の要因によりセンサ金属の変色が進行する。

次に、センサを回収し、金属表面の変色状態について、各種腐食試験による基準マスターデータとの照合を行う。これにより、腐食要因の特定や、腐食環境の定量化と腐食速度の推定を行う。

「腐食環境センサ」は、北海道から沖縄までさまざまな環境条件下の橋梁において適用を図っている。腐食環境因子やその度合いについて、各地域特性や各部位ごとの特性を明らかにでき、これらの結果はさらなる性能の向上に反映されている。

(ii) 腐食環境の定量評価による劣化診断

腐食環境因子の定量化の一つとして、センサ金属の変色を、明度L\*, 色相と彩度を示す色度a\*, b\*の表色系で評価する手法にて数値化して表現している。

これにより、腐食環境の度合いおよび劣化の判定が可能となる。この診断結果に基づき、効率的な予防保全のための、腐食劣化予測やライフサイクルコストをも考慮した最適な防食方法を選定することが可能となる。

4 CFRPによる補修・補強「カーボンエイド」

(1) CFRP (Carbon Fiber Reinforced Polymer) の特長

炭素繊維は軽量、高強度、高弾性、高耐食性などの優れた特性を持つ高性能無機繊維であり、直径7~10μmでこれを3,000~24,000本程度収束させたストランドとされている。このストランドを50cmなど単位幅に数百本並べた炭素繊維シートは、繊維目付け量の違い(200~600g/m<sup>2</sup>)と材料特性の違い(高強度型~高弾性型)がある(表1)。

CFRPとは炭素繊維シートに樹脂を含浸させ完全硬化させたものである。さらにこのCFRPを鋼板表面に接着した試験片の引張試験では、鋼材が降伏するまで炭素繊維シー

表1 炭素繊維シートの種別と特性

Table 1 Characteristics of carbon fiber sheet

種類	引張強度 (N/mm <sup>2</sup> )	ヤング係数 (kN/mm <sup>2</sup> )
炭素繊維シート	高強度型	3400
	中弾性型	2,900 - 2,400
	高弾性型	1,900
鋼	400 - 570	200

トの剥離は発生しない。この荷重 - ひずみ関係は、炭素繊維シートと鋼材の完全合成断面を仮定した計算値とほぼ一致する。鋼材の降伏ひずみ程度の範囲では、引張側も圧縮側もほぼ同じヤング係数を持っており、座屈の生じない範囲では圧縮強度も鋼材に比べて高い。

温度サイクル(20 - 60)100回負荷試験後や、サンシャインウェザロメーターによる10,000時間(約50年相当)促進暴露試験後に行ったCFRPと鋼版の一体試験片の引張試験結果は、それぞれの試験前の結果と比べて引張強度の低下がないことを確認した。

(2) CFRP補修・補強技術の鋼橋への適用

(i) CFRPによる補修・補強方法

鋼橋の部材腐食への対策として、従来の鋼板の当て板工法に変わるものとして、CFRPによる補修工法が有効である。施工は図7に示す から の手順で行う。

このうち、炭素繊維シートの積層貼付は、含浸接着剤を塗布し炭素繊維シートを部材軸方向に貼付け、さらに含浸接着剤を上塗りし、炭素繊維シート内に十分エポキシ樹脂を含浸させる。これを繰り返して、設計で求める必要層数の炭素繊維シートを部材軸方向に貼り付ける。アラミド繊維は、耐衝撃性・耐摩耗性に優れており、将来の塗装塗り替えケレン時における炭素繊維シート保護の機能を果たすので、必要に応じて設置する。

(ii) CFRPによる鋼部材の補修・補強方法の特長

CFRP自体が鋼部材の外的劣化要因を遮断し、耐久性と耐食性に高い効果が得られる。

構造物本体の鋼部材への溶接による熱影響やボルト孔による欠損といった弱点が生じない。

大がかりな架設機材は不要で手作業中心であり、施工スペースの制約がある供用中の補修・補強に適する。

薄く軽量の炭素繊維シートのため、鋼部材表面厚の増加や重量増加を生じさせない。

(iii) 鋼橋への具体的な使用方法

トラス部材や鋼管部材などの腐食(部分腐食や孔食)、狭隘部の疲労き裂に対する補修に適している。さらには、

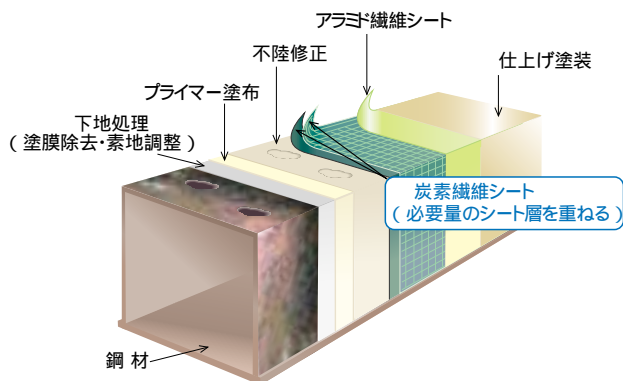


図7 鋼部材のCFRP補修の施工手順  
Fig.7 Work procedure for CFRP repair of steel component

自動車荷重の増大による抵抗断面不足を生じている下フランジ補強や応力低減に適用が可能である。また、じん性向上などを目的とする鋼製橋脚補強にも適用が見込まれる。

あとがき

近い将来、確実に迫り来る膨大な規模のメンテナンスの需要に対して、今後も優れた診断技術や補修技術の開発に努め、これを広く提供することで、社会資本構造物の維持・管理や長寿命化に貢献していきたいと考えている。

参考文献

- 1) 梅田, 尼子, 山田, 澤田, 黒木, 松浦, 西本: “橋梁のリニューアル - 補修・補強技術 -”, 川崎重工技報, No.157, pp.20-23 (2004)
- 2) 仁瓶, 小林, 今井: “疲労センシングの技術開発”, 川崎重工技報, No.151, pp.70-71 (2002)
- 3) 大垣, 川口, 梅田, 仁瓶, 村岸, 小林: “疲労センサによる鋼橋の余寿命診断性能に関する実験研究”, 土木学会第58回年次講演会 -559 (2003)
- 4) 川口, 大垣, 小林, 川尻, 今塩谷: “疲労センサによる余寿命診断と応力頻度計測による手法との比較”, 土木学会第58回年次講演会 -441 (2003)
- 5) 川口, 大垣, 高島, 梅田, 上野, 阿部, 岩崎: “金属の変色を利用した鋼構造物の腐食因子特定に関する研究”, 土木学会第59回年次講演会 -100 (2004)
- 6) 阿部, 川口, 大垣, 梅田, 上野, 高島, 岩崎: “腐食環境センサを用いた腐食環境の定量化と鋼橋への適用”, 土木学会第59回年次講演会 -128 (2004)



川口 喜史



大垣賀津雄



阿部 和浩



上野 善彦



仁瓶 寛太



村岸 治



小林 朋平



高島 顕



岩崎 勇人