

# 第1編 橋梁の点検・調査の現状と将来展望

# 第1編 橋梁の点検・調査の現状と将来展望

## 目 次

1.	はじめに .....	1 - 1
2.	点検・調査手法とその評価方法 .....	1 - 2
2. 1	点検・調査手法 .....	1 - 2
2. 1. 1	疲労き裂 .....	1 - 3
2. 1. 2	腐食 .....	1 - 11
2. 1. 3	コンクリート床版の損傷 .....	1 - 24
2. 2	点検・調査による既設橋の実態把握評価手法とその適用性 .....	1 - 39
2. 2. 1	疲労き裂 .....	1 - 40
2. 2. 2	腐食 .....	1 - 43
2. 2. 3	コンクリート床版の損傷 .....	1 - 46
2. 3	モニタリング .....	1 - 50
2. 3. 1	概要 .....	1 - 50
2. 3. 2	定義 .....	1 - 50
2. 3. 3	適用性 .....	1 - 52
2. 3. 4	実橋で実施された実用例 .....	1 - 57
2. 3. 5	課題 .....	1 - 66
3.	今後の展望 .....	1 - 68
3. 1	新技術 .....	1 - 68
3. 2	展望 .....	1 - 73
4.	おわりに .....	1 - 75

### WGメンバー<旧メンバー>

田 畠 謙一 (大日本コンサルタント株)

荒 居 祐基 (住友重機械工業株)

稲 田 育郎 (横河工事株)

梅 津 省吾 (三菱重工業株)

小 沼 聡 (東京エンジニアリング株)

西 山 富男 (駒井鉄工株)

<小山 敬介>

埴 喜久雄 (株建設技術研究所)

藤 井 健一 (片山ストラック株)

<野神 秀雄>

三 浦 聡 (JIPテクノサイエンス株)

水 谷 慎吾 (JFEエンジニアリング株)

山 本 守 (株日本製鋼所)

## 1.はじめに

点検には、その目的に応じて一般に、日常（通常）点検、定期点検、臨時点検などに分類されている。これらの点検の結果、損傷、変状等が発見された場合には詳細調査が実施され、その健全度に応じて、適宜、補修・補強あるいは追跡調査が行われることになる。

本章では、これらの点検で発見された損傷、変状等の状況に応じた詳細調査を計画、実施するために、どのような検査をどのような計測機器類を用いて行えば、正確で効率よく目的にかなった結果を得ることができるのか、橋梁関連、計測・非破壊検査などの刊行物による文献調査を行い、分かりやすく分類し整理を行っている。

また、点検・調査を継続的に行い、構造物の経年変化を監視するモニタリングについては、損傷の原因究明や補修・補強効果の確認そして橋梁の維持管理計画の策定などを行うために今後ますます重要となっていくことが予想され、ここでは「2.点検調査手法と評価方法」のなかの「2.3モニタリング」の項で紹介している。

なお、この報告書では、主に鋼橋（コンクリート床版含む）を対象とし、鋼部材の損傷である疲労き裂と腐食そしてコンクリート床版の損傷、剥離などを主体とした内容でとりまとめている。

## 2. 点検・調査手法とその評価方法

### 2. 1 点検・調査手法

鋼橋の代表的な損傷である疲労き裂と腐食、そして上部工に最も多く発生しているコンクリート床版の損傷を発見するために実施されている点検・調査手法を最新技術も併せて、それぞれの概要、精度・信頼性、長所・短所、評価方法を一覧表の形でとりまとめている。また、そのあとにそれぞれの手法について内容を補足するための詳述シートを添付している。

## 2. 1. 1 疲労き裂

鋼橋における疲労現象とは、繰返し作用する応力によって発生している。そして応力状態があるレベルより小さければ損傷は生じない。

鋼橋における疲労損傷は、部材の溶接継手部や部材同士の接合部などの極めて局所的な個所にき裂の形で発生する。とりわけ、すみ肉溶接の止端部、ルート部からの発生が多い。又、応力や変形の繰返しに伴い徐々に進行していく。

これらの損傷は早期に発見し適切な補修・補強を行うことが重要となる。そのためには点検検査により軽微な疲労き裂を精度よく検出する必要がある。

疲労・き裂の損傷に対する点検・調査手法としては、次頁以降に詳述するがその前段として熟練者による目視点検が重要となる。

目視点検は表面に発生（開口）したき裂に対してのみ有効であるが、多くのき裂損傷は目視により発見され、その後、非破壊試験法を用いて長さ深さ等の定量的計測が実施されている。そして目視点検では、疲労現象に精通した点検員の判断が重要であり、その結果が、その後の検査体制、補修体制に大きく影響する。

表-1.1 疲労き裂における点検・調査手法

実態把握分類	点検・調査手法	概要(原理)	精度・信頼性	長所・短所	評価方法	参考文献
き裂の有無	目視検査	肉眼によりき裂の有無を調査する。	点検員の疲労・き裂に対する知識経験により精度・信頼性の判断が異なる。	長所: ・疲労き裂による損傷の有無が的確に判断される。 ・点検調査が簡便に行える。 短所: ・疲労き裂の深さ大ききの判断が点検員により異なるケースがある。	肉眼と経験により判定する。 一次点検として行い、疲労き裂が認められたときは他の手法により詳細な点検を行うのが望ましい。	
	磁粉探傷検査	対象物を磁化し、欠陥に磁粉(強磁性体の粉末、一般には蛍光磁粉)を附着させ、き裂部分に滞留した磁粉に紫外線を照射し、表面上の欠陥長さを調べる方法。	塗膜除去が必要。 検査技術者の技量に左右される。	長所: ・方法が簡易でき裂の検出に優れている。部材表面、または表面付近のき裂の検出に有効。微細な長さの測定。 ・微細なき裂の長さを測定するのに有効である。 短所: ・内部損傷は測定できない。 ・き裂の深さも測定できない。 ・表面の凹凸が著しい場合結果の判定に慎重さを要する。 ・電源を必要とする。	導体を磁石により磁化すると材料中に磁束が発生し欠陥部分の両端にN、Sの磁極ができる。この状態で磁粉を振りかけると鉄粉粒子が磁極に凝縮吸着し欠陥上に凝縮模様が見れる。 この方法で欠陥の表面長さの検出・評価する	「鋼橋における劣化現象と損傷の評価」 土木学会 平成8年10月31日第1版 「鋼橋の損傷と点検・診断」 日本橋梁建設協会 平成12年5月
	超音波探傷検査	超音波パルスを鋼材表面にあてがった探触子(送受信器)より伝播させ、内部より戻ってくる反射波(エコー)をブラウン管上で観察する方法。 ①TOFD法 ②フェイズドレイ法 ③10連探触子等がある。	塗膜除去が必要。 過大評価となりやすい。	長所: ・内部き裂の検出に有効。 ・き裂のような面状亀裂に有効 ・片面からのみの検査が可能。 短所: ・き裂の位置、大きさによりバラツキが大きい。 ・欠陥の区別が付きにくい。 ・検査技術者の技量に左右される。	表れるエコーの位置と高さにより欠陥の表面からの位置(深さ)とその大きさを知ることができる。	「鋼橋における劣化現象と損傷の評価」 土木学会 平成8年10月31日第1版 「鋼橋の損傷と点検・診断」 日本橋梁建設協会 平成12年5月
	渦流探傷検査	鋼材などの導電性材料に交流電流を流したコイルを近づけると、欠陥の存在によりコイルに誘起される電圧、電流が変化することを利用して欠陥を検出する方法。	目視点検で疑いのある部位のチェック用として有効である。	長所: ・表面および表層部の欠陥の検出に適す。 ・塗膜上からの試験が可能。 短所: ・表層にしか適用できず、内部探傷は不可能である。 ・正確な寸法推定と形状把握は不可能。 ・検査技術者の技量に左右される。	渦電流の分布および電流の大きさが欠陥の存在により変化する。この変化により欠陥の有無、寸法を測定する。	「鋼橋における劣化現象と損傷の評価」 土木学会 平成8年10月31日第1版 「鋼橋の損傷と点検・診断」 日本橋梁建設協会 平成12年5月
	浸透探傷検査	亀裂内部に浸透液を浸み込ませ、浸透液が現像剤の微粉末中に毛細管現象により吸い出される現象を利用した方法。	実際の欠陥寸法より拡大した像としての指示模様を観察するため推定精度はあまりよくない。 異物等が欠陥部を塞いだ場合浸透液が十分浸透せず検出不可能となる。	長所: ・表面および表層部の欠陥の検出に適す。 ・安価で手軽である。 短所: ・表層にしか適用できず、内部探傷は不可能である。 ・表面の開口幅が狭いき裂の検出は出来ない場合がある。 ・検査技術者の技量に左右される。 ・塗膜の除去が必要である。	現像剤の指示模様により欠陥の大きさを評価する。 き裂の検出精度を高めるためには、浸透液の浸み込み、定着に時間を要する。	「鋼橋における劣化現象と損傷の評価」 土木学会 平成8年10月31日第1版 「鋼橋の損傷と点検・診断」 日本橋梁建設協会 平成12年5月 日本道路協会 平成9年5月
応力状態	活荷重履歴モニタリングセンサーにより構造物が受ける疲労き裂を直接的に評価する方法。	初期応力の導入により、20~30MPa程度の低応力域でも安定した疲労き裂進展特性が得られる。	長所: ・加熱によるセンサー貼付作業の標準化により、初期応力が導入され、低応力域でも安定したき裂進展特性が得られる。 短所: ・ヒーターの熱量不足 ・治具の安定性	SUS304またはAl-Mg合金を材料とし、幅50mm、厚さ0.5mm、ゲージ長さ120~270mmで、機械的切欠き加工を施したき裂先端にクランクゲージを貼り付けて、亀裂進展を直接的に測定する。	「活荷重履歴モニタリングセンサーの開発」 橋梁維持管理・保全フェア講習会テキスト 2001.1	
	疲労センサーのき裂進展量測定値により実構造の疲労損傷度を推定する。	ニッケルスリット管に引張残留応力を生じさせひずみ感度を向上させている。	長所: ・形状がひずみゲージ並に小さいためホットスポット応力の計測が可能。計測器や配線が不要なので低コストである。	センサーを定期的に点検し、測定箇所の疲労ダメージを推定する。	「疲労センサーによる損傷モニタリングの橋梁への適用」 土木学会第57回年次学術講演会	
	圧電フィルムにより鋼構造物の応力・頻度を長期間、低コストで計測、疲労、損傷度を簡易的にモニタリングする装置。	ひずみゲージとの比較で±5μst	長所: ・小型バッテリーにより約4ヶ月間の長期観測が可能。	ひずみ速度に比例した電圧を出力する圧電フィルムを使い、積分回路を通すことによりひずみ信号に変換するものである。	「圧電フィルムによる変動応力頻度簡易計測システムの開発」 土木学会第57回年次学術講演会	

分類	疲労	実態把握分類	き裂の有無
手法	磁粉探傷検査		

### 概要（原理）

対象物を磁化し、欠陥に磁粉（強磁性体の粉末・蛍光磁粉）を付着させることによりその付着状況から欠陥の有無、欠陥長さを調べる方法。基本原理は図-1のように導体を磁石により磁化すると材料中に磁束が発生し欠陥部の両端にN、Sの時局ができる。この状態で磁粉を振りかけると鉄粉粒子が磁極に凝縮吸着し欠陥上に凝縮模様が現れる。

### 適用範囲

磁性材料（鉄鋼材料等）のみに適用できる。部材表面又は表面付近のき裂の検出に有効である。橋梁部材では疲労き裂の発生箇所が狭あいな部位に多くみられる。従って極力小さいものが望ましい。

### 調査方法

鋼材を磁化した時、鋼材の中を磁束が通る。磁束を遮るような不連続部（キズ、割れ等）が存在すると、その部分で磁束は迂回して外側に漏れてくる。そこに鉄粉を近づけると、鉄粉が磁化されて凝集吸着し磁粉模様を形成する。この時紫外線を照射すると蛍光磁粉のためより簡便に観察できる。

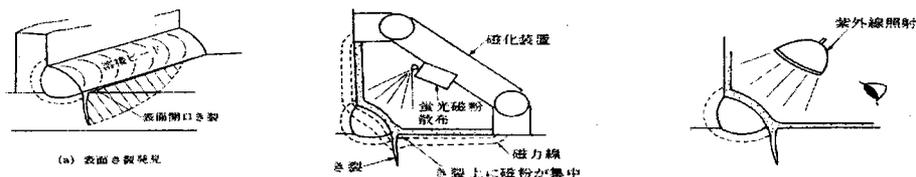
### 評価方法

調査方法が簡易で表面及び表面付近の欠陥き裂の検出に優れている。

### 実施手順

- ① 目視により表面開口き裂を検出し、塗膜を除去する。かつ内等に残留している塗膜も丁寧に取り除く。
- ② き裂長さ方向に対して直角方向に磁化し、蛍光磁粉を散布する。
- ③ 磁化しながら紫外線を照射し、磁粉の付着状況を観察し、磁粉の流動が停止した後、磁化を止めき裂の長さを計測する。

鋼橋における劣化現象と損傷の評価



分類	疲労	実態把握分類	き裂の有無
手法	超音波探傷検査		

### 概要（原理）

超音波は高周波の音波であり、金属などの物体中を一定方向にだけビームとして伝播していく。そこで種類の異なる物体に当たるとそこで反射される。これらの特性を利用して欠陥の有無、位置、大きさを知る。

### 適用範囲

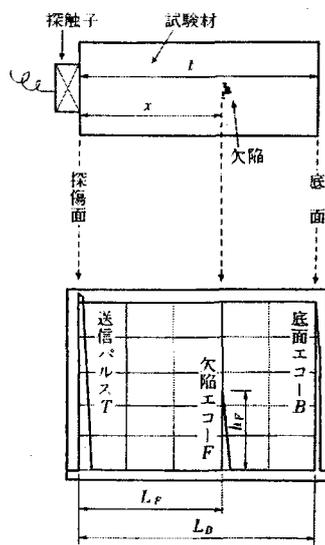
金属、非金属、プラスチック、その他超音波を透過させる材料。

### 調査方法

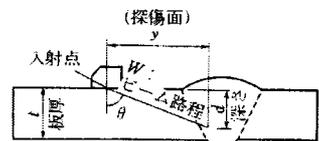
超音波パルスを鋼材表面にあてがった探触子（送受信器）より伝播させ、内部より戻ってくる反射波（エコー）をブラウン管上で観察する。

### 評価方法

ブラウン管上に表れるエコーの位置と高さにより欠陥の表面からの位置（深さ）とその大きさを評価できる。



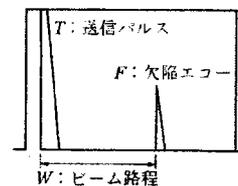
垂直探傷試験の概要



(a) 直射法



(b) 一回反射法



斜角探傷試験の概要

分類	疲労	実態把握分類	き裂の有無
手法	渦流探傷検査		

### 概要（原理）

鋼材などの導電性材料に交流電流を流したコイルを近づけ欠陥の存在によりコイルに誘起される電圧、電流が変化することを利用して欠陥を検出する方法。

### 適用範囲

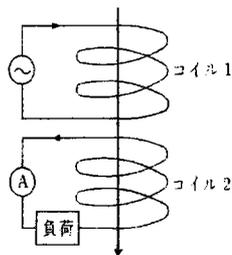
導電材料に限定される。

### 調査方法

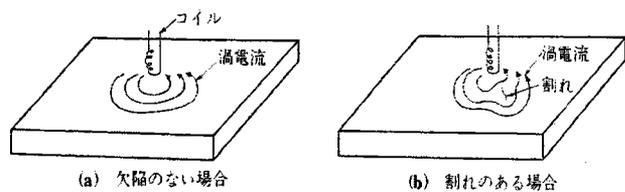
一次コイルにより測定物に渦電流を与える。もし表面にひび割れ等の変化があると、渦電流が変化し、それを二次コイルで検出して損傷を判別する。

### 評価方法

渦電流の分布および電流の大きさが欠陥の存在により変化する。この変化により欠陥の有無、寸法を測定する。渦電流は欠陥の有無や大きさだけにより変化するのではなく、対象物の形状、材質、コイルの寸法（渦電流の発生範囲）によっても変化する。これらの要因は欠陥の検出の妨げとなりノイズによる信号かどうかの判断が必要となる。現在汎用されているポータブルタイプの装置を使用した場合部材端より10mm程度の範囲ではき裂の検出が困難である。また、複雑な形状をしたき裂の検出に関してはその形状の把握は不可能である。



電磁誘導現象の概念図



渦流探傷試験の基本原理

分類	疲労	実態把握分類	き裂の有無
手法	浸透探傷検査		

### 概要（原理）

き裂内部に浸透液を染み込ませ、浸透液が現像剤の微粉末中に毛細管現象により吸い出される現象を利用した探傷法である。

### 適用範囲

部材表面に開口している欠陥のみが検出可能である。開口欠陥を肉眼で確認しやすくするために、実際の欠陥寸法よりも拡大した像として指示模様を観察する。

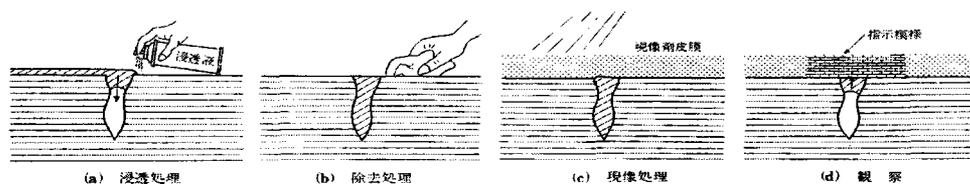
### 調査方法

作業工程は下記の4段階である。

- ① 洗浄処理 目視により表面開口き裂を検出した後、塗膜を剥離し、粉塵、錆、水分など付着物を除去する。塗膜剥離の範囲は20mm程度を必要とする。検出範囲の洗浄を行う。
- ② 浸透処理 き裂発生部にスプレーにより赤色の浸透液を塗布し、塗りむらの無いようにする。浸透時間は、部材表面温度が15～50℃の範囲で最小10分程度が目安となる。表面の余剰浸透液を可能な限りウェスで除去する。除去はウェスに洗浄液を含ませる。
- ③ 現像処理 部材表面に現像液を均一に薄く塗布する。現像時間は最小7分程度を目安とする。
- ④ 観察 現像液が乾燥すると、き裂内部の浸透液がその表面上に吸い出され、その指示模様を十分な明るさの下で観察する。

### 評価方法

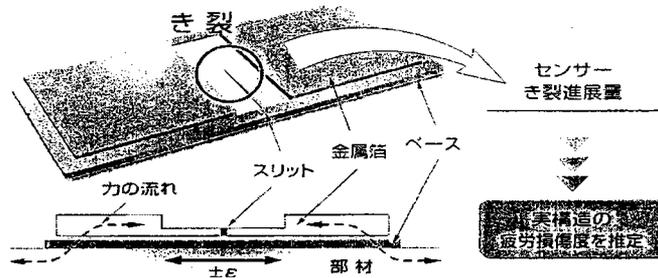
き裂の検出精度を高めるためには浸透液の染み込み定着に時間を要する。開口欠陥を肉眼で確認しやすくするために、実際の欠陥寸法よりも拡大した像として指示模様を観察する。そのため、欠陥の表面寸法に関する推定精度はあまりよくない。また、表面の開口量がわずかである微少な疲労き裂やき裂内部に異物が詰まっているような場合などでは浸透液がき裂内部に十分浸透せず検出が不可能なこともある。



分類	疲労	実施把握分類	応力状態(活荷重履歴モニタリング)
手法	センサーを用いて直接評価を行う。		

### 概要

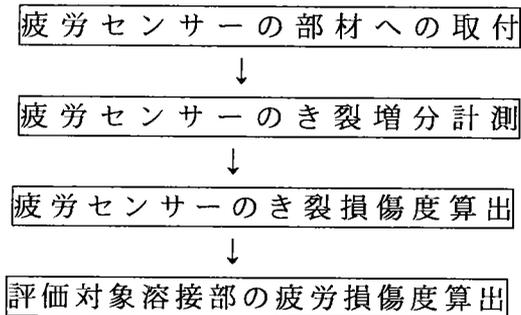
既設橋を維持管理・補修していくため、疲労損傷に対する応急補修の必要性、効果の判断、疲労き裂の発生が予想される部位、発生時期を判断するために、金属箔のき裂進展特性を応用した疲労センサーを用いて橋梁疲労損傷度を推定する。



### 適用範囲

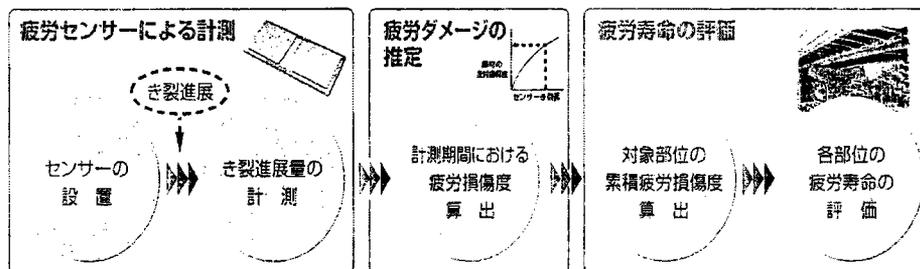
形状が小さいので、構造的応力集中を生ずる箇所への適用も可能である。

### 調査方法



### 評価・利点

- ① センサー部に、き裂を進展させるために設けた薄板をベースに予め接合した構造とし、貼付作業の省力化を試みる。
- ② ベース材に薄板より線膨張率の低い材料を採用し、センサー使用温度より高温で接合させ、薄板に引張りの残留応力を生じさせ、ひずみ感度を向上させる。



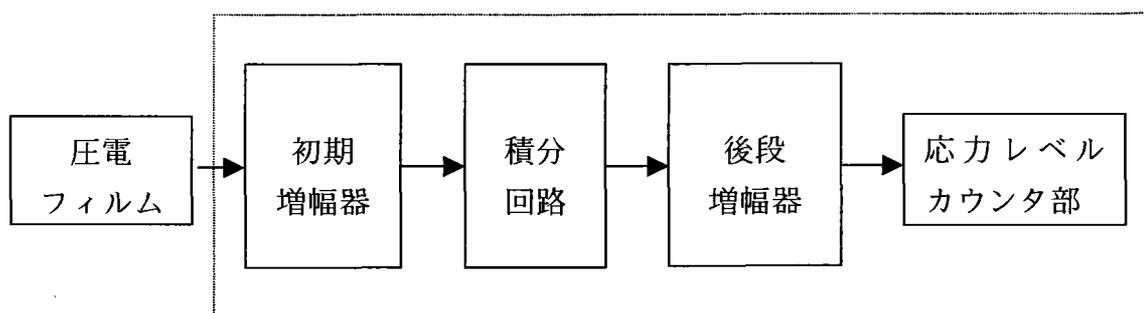
分類	疲労	実態把握分類	活荷重履歴モニタリング（応力状態）
手法	センサーを用いて直接評価を行う（電源不用）		

### 概要（原理）

圧電フィルムで発生する微小電圧を増幅して積分回路を通し後段増幅器で出力信号を 20～1000 倍に増幅する。 応力レベルカウンタは正負側各々 5 段階のレベルを超えた場合の回数をカウントする機能を有する。

また、消費電力が 5 mA と少なく商用電源を用いず圧電フィルムとアナログ回路データ収録装置で変動応力レベルとその頻度を長期間観測することを可能にした。

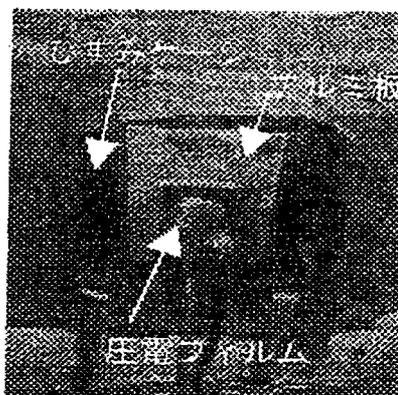
データ収録装置は横 300 mm × 幅 100 mm × 高さ 220 mm と非常にコンパクトである。



データ収録装置範囲

### 適用範囲

本機器を使用してひずみ計測精度の検証を行った結果はアナログ回路データ収録装置との最大ひずみ値で  $\pm 5 \mu st$  以内の計測精度であった。 ただし、本機器現在観測試験を継続中でありその結果が注目されている。



施工状況写真

## 2. 1. 2 腐食

鋼橋の防錆・防食のために塗装が行われているが、構造的・環境的要因から塗膜の劣化が進行し、腐食に進行するケースが多く、過去には部材の破断にまで至った例もある。

塗膜は、大気中に暴露されると経年とともに劣化が進行し、次第に光沢や防錆性能が失われ、変退色に始まり、点さび、割れ、ふくれ、剥離等が生じ腐食が発生する。

鋼橋の腐食は、全体に均一に進行するものではなく、桁端部や格点部などの湿潤状態となりやすい部位や、高力ボルト継手部や部材こぼ面など塗膜品質の確保しにくい部位に局部的に進行するケースが多くきめ細かな維持管理を行うことが大切である。

一覧表では、塗膜の劣化から腐食に至る過程に適応した代表的な点検・調査手法をとりまとめており、鋼橋のライフサイクルコスト低減への一助になればと考える。

表-1.2 腐食における点検・調査手法

実態把握分類	点検・調査手法	概要（原理）	精度・信頼性	長所・短所	評価方法	参考文献	
塗膜の劣化	白亜化 白亜化度試験器 目視検査	塗膜表面に一定の荷重で圧着した印画紙に白亜化物を付着させ、その汚れの程度を目視によって評価写真と比べ白亜化度とする。	塗膜の表面が濡れている場合には的確な評価は出来ない。	肉眼での評価に比べ、塗膜の色の影響を回避して評価できる。	印画紙に付着した汚れの程度を評価写真と比較して評価する。	鋼橋劣化調査マニュアル JSS M 03 1993 (社) 日本鋼構造協会 平成5年9月	
	変退色	色差計	JIS Z 8722「物体色の測定方法」 「4.3 反射物体の測定方法」により測定する。	測定器により測定値の機差があるので、同じ測定器を用いるようにする。	色差の測定値は同じ大きさであっても、色の種類によって肉眼で感ずる差異の程度と一致しない場合がある。 (例えば、淡彩色系では差を大きく感じ、濃彩色系では少ないと感じる。)	暴露面を色差計を用いて測定し、基準板とのデータの差から判定する。	
		光沢計	塗膜面に60°の入射角で光束を入射させ、鏡面反射方向に反射する光束を受光器で測定する。	測定機器間の機差はあまり無いが、できれば同一機器で測定することが望ましい。	無光沢や光沢度が高い場合は光沢度の測定値と肉眼での光沢度が異なる場合がある。	水洗前の測定は、塗膜の現状を総合的に評価するものである。 これに対し、水洗後の測定は、塗膜自体の状態を評価するものであり、光沢度の経時的変化は水洗後に評価すべきである。	
	点さび・さび	目視検査 (双眼鏡) (拡大鏡) (カメラ)	目視で判別できる大きなさびの発生に偏らないよう双眼鏡、拡大鏡などを用いてその状況を観察して「標準図」との対比で評価を行い、必ず写真撮影も行う。	塗膜調査で最も重視されるのは目視検査であるが、塗膜の劣化程度を定量的に評価するためには点検員による差を少なくする必要がある。	さびの発生が部分的であったり、偏っていたりするときには判定を誤る場合がある。	調査対象面に発生しているさびを全て対象とし、標準図と対比しながら評価を行い評価点で表す。	
		画像処理	塗膜の劣化状態を8mmビデオやCCDカメラ等を用いて撮影し、コンピューターによる画像処理を行い劣化面積を算出し、塗膜の劣化度を評価を行い寿命(塗替え時期)を推定する。	塗料や塗膜に関する知識や経験に関係なく客観的、定量的に評価することが可能である。	塗膜の劣化のみならず、コンクリート構造物等の損傷、劣化診断などにも応用可能である。	判定基準(標準劣化写真等)と照合し、劣化度を評価する。	鋼橋の長寿命化のための方策 (塗装からの取り組み) (社) 日本鋼構造協会 平成14年10月
	割れ ふくれ	目視検査 ピンホール検査	テスラーコイル、直流高電圧又は高周波電源を備えた装置で、素地金属を一つの電極とし、走査端子をもう一方の電極として被覆層表面を走査したときのスパークの有無等で、ピンホールの有無を判定する。	一般的な測定可能膜厚は200~300μ、特別なもので500μ程度。	原理や操作が簡単で、危険性が少なく、小型化しやすい。	メータで電気抵抗値を表がする物と単にブザーで導通をチェックするものがある。	さびを防ぐ事典：産業調査会 昭和56年4月
	剥離	1) 基盤目試験 2) 引張剥離試験 (テープテスト) 3) 描画試験	1) 基盤目試験：塗面に鋭い刃又は針で、間隔1mmで互いに直行する11本ずつの素地面に連する傷をつけて100個の正方形(1mm <sup>2</sup> )に分割する。 2) 引張剥離試験：基盤目試験の後、塗面に接着テープを貼付けてからはがし、残ったマス目の%を付着力の尺度とする。 3) 描画試験：マス目でなくトロコイド曲線を描く方法で、付着力と引張強度のバランスを見るような試験。	テープの粘着性のムラや測定者のテープの剥離速度などのバラツキが多く、再現性に乏しい。	簡単に実施しやすいが、バラツキが多い。	切り込みを入れた際に、剥離しないで付着して残ったマス目の%を付着力の尺度とする。	鋼橋塗膜調査マニュアル JSS M 03 1993 (社) 日本鋼構造協会 平成5年9月  JISハンドブック 30 塗料
アドヒージョン試験		直径20mmの底面をもつ接着子を強力な接着剤で皮膜面に接着し、接着子の周囲に切込みを入れておき、皮膜に対し垂直に引張荷重が加わるよう接着子を引き上げ、皮膜が剥離した瞬間の荷重を記録する。	・測定範囲：0~2.8kN/cm <sup>2</sup> ・信頼性：皮膜が剥離した時の最大トルクが保持されるようになっており信頼性も高い。	・荷重は上部のハンドルまたはナットを回すだけで簡単に加えられ、読み取りやすい。 ・最適な接着剤と接着方法を選択することが肝要である。	剥離した瞬間の荷重を接着子面積で除した値を密着度とする。		
腐食	超音波厚さ計 (マイクロメーター) (ダイヤルテプスゲージ) (ストレッチゲージ)	極めて短い超音波パルスが金属内部に伝わらせ、金属底面から反射されてくるまでの時間差から板厚(腐食量)を測定する。	汎用タイプとしては、±0.1mmのものが多くが高性能なものでは、1/100mm表示のものもある。 検査対象物の表面精度によるが、測定機器としての信頼性は高い。	超音波厚さ計は、表面の凹凸がはなはだしい場合には測定結果の評価を誤りやすい。	超音波により共振を起こして板厚を評価する。	鋼橋のLCC評価と防食設計 (社) 日本鋼構造協会・鋼橋の性能照合型設計 対応研究委員会 鋼橋の防食・LCC研究会 平成14年9月	
	簡易腐食モニター装置	交流インピーダンス法や電気抵抗測定法を採用した簡易腐食モニター装置を用いて、腐食による電荷移動抵抗(腐食速度に反比例する抵抗)の変化を測定する。	交流インピーダンス法と電気抵抗測定法を比較した場合、交流インピーダンス法の方が推定精度は高い。	腐食速度のモニタリング方法として、質量減法が最も一般的であるが、データの信頼性が高い反面、データを得るまでには長時間を要する。 一方、簡易腐食モニター装置は比較的短時間で腐食速度モニタリングが可能であり、一般的に使用されている。	簡易腐食モニター装置を用いて測定した腐食による電荷移動抵抗の変化から腐食速度換算定数を算出し、通常提案されている値と比較し腐食速度を推定する。	金属材料の腐食速度モニタリングに関する検討 物ナカボーテック 平成15年7月	
	全磁束法	ロープ中の磁束がロープ断面に比例することを原理としており、健全部と腐食部の磁束を測定し腐食による断面減少を評価する。	全磁束法は腐食や摩耗など広がりをもった欠陥の検査方法としては有効。	磁化方法 ①極間磁化方式：磁化装置の着脱は簡単であるが、装置が重く、磁化効率が悪い。 ②ソレノイド方式：磁化装置の着脱作業に時間がかかるが、磁化効率が高いため小型・軽量化が図れる。	磁束と断面積の比例関係で断面の減少を評価する。	長尺橋NEWSレター No11 本州四国連絡橋公団 長尺橋技術センター 本紙公開情報 2007-07-07の非破壊検査 平成14年3月 他より引用	

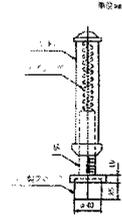
分類	腐食	実態把握分類	塗膜の劣化／白亜化
手法	白亜化度試験器、目視検査		

### 概要（原理）

湿らせた黒色印画紙を塗膜表面に当て、一定の荷重で圧着して印画紙に白亜化物を付着させる。その汚れの程度を目視によって評価写真と比べて白亜化度として評価する。

#### —白亜化度試験器—

ハンドルと柄とは金属で、柄にはハンドルを押し付けたとき荷重N (kgf) を示す5目盛が5～25まであり、柄の先端にゴム製ブロックを備えている。ゴム製ブロックの硬さは、JIS K 6301（加硫ゴム物理試験方法）に規定するスプリング式硬さ試験器のA形で試験して、48～53Hsとする。



白亜化度試験器

### 適用範囲

塗膜の白亜化は、紫外線などにより塗膜表面が分解して粉状になった現象であり、橋梁などでは全体に白っぽく変化するため、初期の状況と比較しなければ色合いによっては肉眼評価は困難である。したがって外観評価に際しては、予め塗膜表面を指先などでこすり、白亜化であることを確認してから初期の色に該当する標準色見本帳（日本塗料工業会）などと比較して評価する必要がある。塗膜の表面が濡れている場合は、的確な評価ができないので、塗膜が乾燥状態のときに行う。肉眼での評価に比べ、塗膜の色の影響を回避して評価できる。

### 調査方法

①写真印画紙（予め露光して現像したモノクロ写真印画紙の中から面の色・つや・粗さが均等なものを選び、約50mm×50mmに切ったもの）を約15分間水に浸したあと取り出し、直ちに乾いたガーゼで表面を軽く押えて水滴を吸い取る。

②測定箇所印画紙を置き、その上に白亜化度試験器のゴム製ブロックを水平に載せ、荷重が196.1N（20kgf）を示すようにハンドルを約5秒間垂直に押し付ける。尚、現場における簡便な試験方法として、セロテープによる調査方法がある。

塗膜表面にセロテープを隙間なく貼り付けてはがし、そのセロテープを黒色の紙もしくはプラスチックシート上に貼り付けて、白亜化の程度を目視により標準図（日本塗料検査協会の白亜化標準判定写真）と比較することによって評価する。

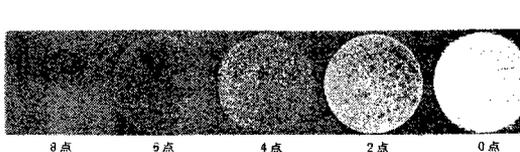
### 評価

・耐候性を評価する一項目として、塗膜表面に生ずる白亜化（フォーキング）の程度を定量的に評価する。

①印画紙についての汚れの程度を以下の評価写真と比べ点数で評価する。

②評価写真による評価が中間程度の場合は中間の点数とし、黒い印画紙になにも付かない（白亜化した粉状のものが付かない）ものは10点とする。

#### 白亜化度の評価基準



評価写真及び評価点

評価点 (RN)	白亜化度評価点	はがれ発生面積
3	8点以上	殆ど変化なし
2	6点	僅かに白っぽい
1	4点	かなり白っぽい
0	2点以下	殆ど真っ白である

分類	腐食	実態把握分類	塗膜の劣化／変退色
手法	色差計		

### 概要（原理）

測色は、JIS Z 8722（物体色の測定方法）「4. 3 反射物体の測定方法」に規定されている方法により測定する。

色差は、下記の計算式によって $\Delta E$ として表され、 $\Delta E$ が小さいほど変退色が小さい。色差計ではこの演算回路が内蔵され、自動的に計算できるものが多い。

$$\Delta E = [(\Delta L^*)^2 + (\Delta a^*)^2 + (\Delta b^*)^2]^{1/2}$$

$\Delta E$ ：色差。表色系を特に明記する必要があるときは $\Delta E^*_{ab}$ と記述する。

$L^*$ ：明度指数。白－黒を表す。「エルスター」と読む。

$a^*$ ：クロマティネス（色相と彩度）赤－緑方向を表す。

$b^*$ ：クロマティネス（色相と彩度）黄－青方向を表す。

### 適用範囲

色差を生ずる原因は、塗膜表面成分の顔料分の劣化、樹脂分の劣化、汚れ付着、白亜化などである。なかでも、顔料分の劣化による影響が大きい。

色差的の経済的变化を測定する場合は、水洗後の塗膜自体についての色差を評価の対象とする。

### 調査方法

- ①機器の操作は、各使用機器の取扱要領に従う。
- ②携帯用色差計を用い、暴露塗面を測色して基準板でのデータの差から $\Delta E$ を求める。保存基準板との色差を求める場合は、暴露塗面と基準板について測定し、 $\Delta E$ を求める。
- ③塗膜を洗浄して、②と同様に水洗後の測色を行う。
- ④機器の使用にあたっては、各機器メーカーによる数値的なばらつきが生じる場合があるため機器を統一するのが良い。

### 評価

①色差測定には、色差計を用いて色の变化（上塗塗料の原色との色差）を定量的に測定する。上塗塗料の耐候性の重要な指標である。

②測定結果は、色差的の成分の値 $\Delta L^*$ 、 $\Delta a^*$ 、 $\Delta b^*$ を併記するのが望ましい。

色差的の評価基準	
評価点(RN)	色 差
3	$\Delta E \leq 1.0$
2	$1.0 < \Delta E \leq 3.0$
1	$3.0 < \Delta E \leq 10.0$
0	$10.0 < \Delta E$

### 「参考規格」

- ①JIS Z 8422：物体色の測定方法
- ②JIS Z 8730：色差表示方法

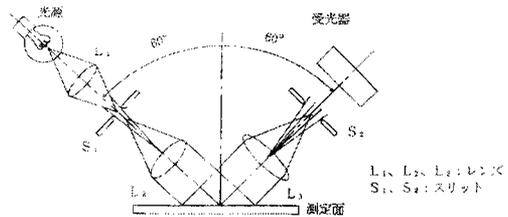
分類	腐食	実態把握分類	塗膜の劣化／変退色
手法	光沢計		

### 概要（原理）

入射角と受光角が同じときの反射を鏡面反射という。

鏡面光沢度は、下図に概要を示す装置により、塗膜面に $60^\circ$ の入射角で光束を入射させ、鏡面反射方向に反射する光束を受光器で測定する。

鏡面光沢度は、基準面での光沢度を100%として、塗膜面での光沢度を百分率数で表す。基準面としては、屈折率1.567のガラスの平面を用いる。



60° 鏡面光沢度測定装置概要

### 適用範囲

無光沢や光沢度が高い場合は、光沢度の測定値と肉眼での光沢感が異なる場合がある。この場合、入射角を変更する（例えば、 $85^\circ$ 、 $20^\circ$ ）とより整合することが知られているが、現場では機器の変更を行うのは困難であるので $60^\circ$ 鏡面光沢度のみにより測定することとする。

測定値についての判断を行う場合には、このような現象があることを考慮する必要がある。

### 調査方法

- ①基本的な方法は、JIS K 8741 の $60^\circ$ 鏡面光沢度測定を適用する。
- ②測定器の操作は、各使用機器の取扱要領に従う。
- ③測定は水洗前と粉化物、こびりついた汚れを水洗除去した後に実施する。  
（塩分測定を実施する箇所では測定すると便利である。）
- ④測定は、塗面のはけ目に沿った方向とはけ目に直行した方向で計り、同一点2回の平均値で表す。但し、測定値のばらつきが大きい場合は、繰り返し測定することが望ましい。

### 評価

塗膜は大気中に暴露されると太陽光線（特に紫外線）、水分、熱、各種ガス等の影響を受けて表面から徐々に劣化が進行し、光沢が減少する。

- ①光沢度の経時的な変化
  - ②塗膜の劣化状況
- を評価する。

#### 「参考規格」

- ①JIS K 8741：表面光沢度測定方法
- ②JIS K 5400, 7.6：鏡面光沢度

分類	腐食	実態把握分類	塗膜の劣化／点さび、さび
手法	目視検査、双眼鏡、拡大鏡、カメラ		

### 概要（原理）

塗膜下の腐食は複雑な経過のもとにおこり、さびの発生形態（点さび、ふくれさび、割れさび）や分布状態は様々である。

塗膜のさびは、その進行状態によって、鋼橋の機能に重大な影響を及ぼすために、発生形態や状態にかかわらず、十分に注意して観察、記録する。

また、塗膜表面がさび汁で汚れている場合、さびの発生と評価しやすいので、さび汁発生箇所とその周辺の状態をよく確認することが必要である。

また、目視で判別できる大きなさびの発生のみには偏らないよう双眼鏡、拡大鏡などを用いてその状態を観察して評価を行い、必ず写真撮影も行う。

### 調査位置

さび調査においては、塗膜劣化を生じやすい下記の条件を配慮しながら調査する。

- 1) 構造上重要な部位、部分、あるいは水溜り部分や漏水部分。
- 2) 日照、結露、風向きなどの気象条件を受けやすい部分および塵埃の堆積しやすい部分。
- 3) 工場・海岸などの腐食促進物質発生源の影響を受けやすい部分。
- 4) 河川橋における川上、川下、河川敷きのような環境条件の影響など。

### 調査方法

さび発生調査は、調査対象面に発生しているさびを全対象とし、標準図と対比しながら評価を行い評価点で表す。一般に調査は部位別に分けて径間ごとに評価する。鈹桁を例にとると、腹板、上フランジ、下フランジ上面、下面、添接部、対傾構などに分けて評価を行い評価点で表す。

さびの発生形態や状態で分類できるものについては、備考欄などに記入する。

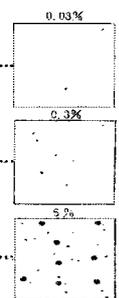
### 評価

・塗膜の劣化原因を究明し、塗替え時期を判断する。

「塗替え」の判断目標は評価点が1になったとき（さび発生面積0.3%を超したとき）を塗替え時期とする。さびの評価点及び発生限度標準図を下記に示す。

#### さび 評 価 点

評価点 (RN)	発 生 状 態	
	発生面積 (%)	外 観 状 態
3	$X < 0.03$	異常なし 誰が見ても外観的にはさびが認められない。 さびらしきものがあったとしても無視しえる程度のもの。
2	$0.03 \leq X < 0.3$	僅かにさびが見られる。 さびが観察される部分以外の塗膜の防食性能はほぼ維持されていると思われる状態。
1	$0.3 \leq X < 5.0$	明らかにさびが見られる。 誰が見ても発錆部分が多く、何らかの処置を施さなければならない状態。
0	$5.0 \leq X$	見かけ上ほぼ全面にわたってさびが見られる。 早急に塗装を塗り直さなければならない状態。

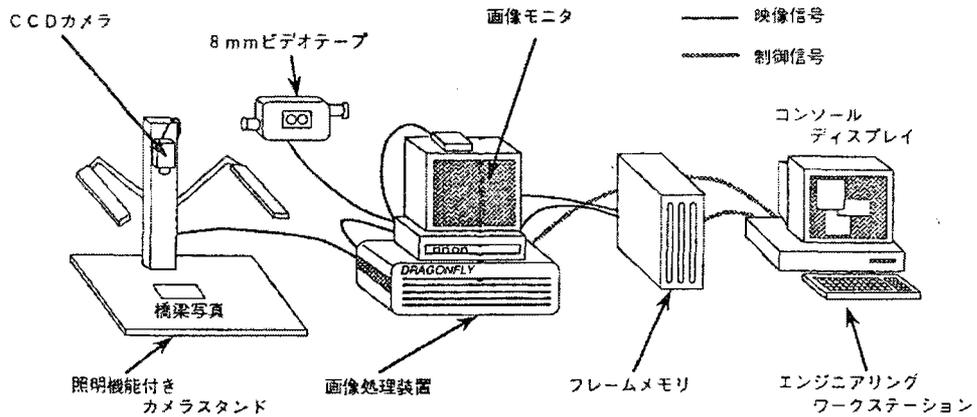


さびの発生  
限度標準図

分類	腐食	実態把握分類	塗膜の劣化／点さび、さび
手法	画像処理		

**概要（原理）**

塗膜の劣化状態（さび発生面積）を8mmビデオやCCDカメラ等を用いて撮影し、コンピューターにより画像処理（白黒写真で中間色のある色まで白か黒で行い、カラーの場合は3原色における色の濃淡から計算）を行い、劣化面積を算出する。



画像処理システム構成図

**適用範囲**

コンクリート建造物の損傷、劣化診断にも適用されている。

**調査方法**

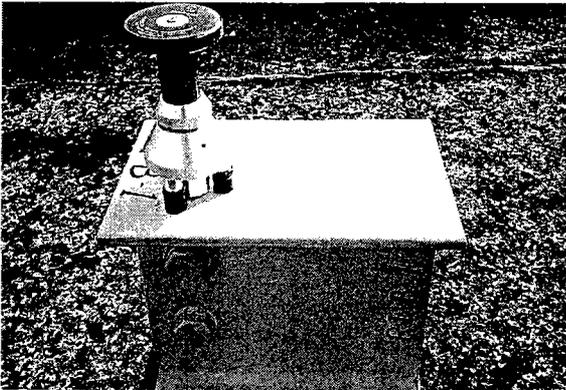
- 1) カメラもしくはビデオを用いて塗膜劣化評価の対象部位（全体写真）を撮影する。
- 2) 撮影した画像をコンピューターに入力し、専用プログラム（市販で各種あり）により、画像処理を行い、劣化部を抽出する。
- 3) 抽出した劣化部ごとに劣化部の面積、周囲長、円形度等の特徴量と各種の統計量を算出する。
- 4) 判定基準（標準劣化写真等）と照合し、劣化度を評価する。

**評価**

コンピューターによる画像処理技術を応用することで、塗料や塗膜に関する知識や経験に関係なく、塗膜の劣化度（劣化現象）を客観的、定量的に評価し、余寿命（塗替え時期）を推定する。

分類	腐食	実態把握分類	塗膜の劣化／ふくれ、割れ
手法	目視検査・ピンホール検査		
<p><b>概要（原理）</b></p> <p>ピンホールとは本来針で突いたような孔のことを指すのであるが、その被覆の一部が欠落した微小部分をピンホールという。</p> <p>これらの欠陥を電氣的に検出する一つの手法として「ピンホール検査」が有効である。</p> <p>ピンホール検査とは、テスラーコイル、直流高電圧または高周波電源を備えた装置で、素地金属をマイナス極にとり、もう一方の走査端子（電解質の液を浸したものを）をプラス極とし、製品上を走査すると欠陥中に電解液がしみこみ導通する。これを検出し、メーター（ブザー）等に表示するものである。</p> <p><b>適用範囲</b></p> <p>ピンホール、割れ、微小ふくれ、介在物および局所的な薄膜部などの検出に用いられ、一般的な測定可能膜厚は、200～300 μmで、特別なものでは500 μm程度である。</p> <p><b>調査方法</b></p> <p>塗膜表面を走査することにより、メーターで電気抵抗値を表示するものと、ブザーで導通をチェックするものがあり、その表示回数を欠陥の数量と判定する。</p> <p>尚、電氣的に検出する際には塗料固有の電氣的性質や表面の特性、表面の濡れ状態や汚れ状態等も考慮しなければならない。</p> <p><b>評価</b></p> <p>ピンホール検査で把握した欠陥の分布状況、目視検査による外観の損傷状況から塗膜の劣化状態を全体的に評価し、</p> <p>①補修塗装の必要性 ②塗り替え塗装の時期 等を判定する。</p>			

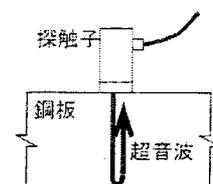
分類	腐食	実態把握分類	塗膜の劣化／剥離								
手法	碁盤目試験・描画試験・引張剥離試験										
<p><b>概要（原理）</b></p> <p>塗膜の剥離（密着不良）は、前処理上の欠陥に起因することが多いが、ある時期を経過した後、外観上の欠陥となって現れる。これを直接、引張荷重として定性的にとらえる方法が密着（付着）性試験であり、一般に使用されている手法が以下のものである。</p> <p>1) 碁盤目試験（クロスカット） 塗面に鋭い刃（カッターナイフ）または針で、1 mm（または2 mm）の間隔で互いに直行する11本ずつの素地面に達する傷を碁盤目状に付ける。その際剥離しないで残ったマス目の%を付着力の尺度とする手法。</p> <p>2) 描画試験 碁盤目状ではなくトロコイド曲線を描く方法で、付着力と引裂強度のバランスを見るような試験。</p> <p>3) 引張剥離試験（テープテスト） 碁盤目試験による切込み部に接着テープを十分に貼付けてからテープをはがし、残ったマス目の%を付着力の尺度とする手法。</p> <p><b>適用範囲</b></p> <p>碁盤目試験によって素地まで切り込まれたときの素地からの剥離に対する塗膜の耐久性を評価する試験で、付着力の測定手段としてはならない。単一塗膜又は多層塗膜系の付着力を評価する場合は、アドヒージョン試験を実施する。また、この方法は気温5℃以下または、塗膜面の温度が5℃以下の場合にはテープの付着力が著しく低下するため避けたほうが良い。高温（35℃以上）の場合も同様である。</p> <p><b>調査方法</b></p> <p>①切り込み用ガイド等を用いて素地に達する切込みを入れる。 ②切り込みの入れ方は、碁盤目とクロスの二通りがあり、塗膜厚や塗料の種類により使い分ける。（例えば、ASTM D 3359の場合は、塗膜厚で区分している。）</p> <table border="1" style="margin-left: auto; margin-right: auto;"> <thead> <tr> <th>塗膜厚</th> <th>切り込み方法</th> </tr> </thead> <tbody> <tr> <td>50 μm以下</td> <td>1 mm間隔碁盤目</td> </tr> <tr> <td>50～125 μm</td> <td>2 mm間隔碁盤目</td> </tr> <tr> <td>125 μm以上</td> <td>クロスカット</td> </tr> </tbody> </table> <p>③切り込み部にセロハンテープを十分に貼り付ける。 ④テープを付着して5分以内にテープを引き剥がす。その際、できるだけ60°に近い角度でテープの端をつかみ、0.5秒～1.0秒で確実に引き剥がす。 ⑤剥離状態を評価基準（例えば、JSS IV 03／鋼橋塗膜調査、JIS K 5600-5-6、ASTM D 3359等）と照合し、判定する。</p> <p><b>評価</b></p> <p>素地からの剥離に対する塗膜の耐久性を評価する。</p>				塗膜厚	切り込み方法	50 μm以下	1 mm間隔碁盤目	50～125 μm	2 mm間隔碁盤目	125 μm以上	クロスカット
塗膜厚	切り込み方法										
50 μm以下	1 mm間隔碁盤目										
50～125 μm	2 mm間隔碁盤目										
125 μm以上	クロスカット										

分類	腐食	実態把握分類	塗膜の劣化／剥離
手法	アドヒージョン試験（付着力試験）		
<p><b>概要（原理）</b></p> <p>塗膜の剥離（密着不良）は、前処理上の欠陥に起因することが多いが、塗膜の劣化の進行にしたがい付着力が低下する。 これを直接、引張荷重として定量的にとらえる方法として密着（付着）力試験である。</p> <p>・アドヒージョン試験（付着力試験） 直径20mmの底面をもつ接着子（端子）を強力な接着剤（シアノアクリレート系または無溶剤エポキシ樹脂系）で塗膜に接着し、端子の周囲の塗膜に切り込みを入れておき、塗膜に対して垂直に引張荷重が加わるように端子を引き上げ、塗膜が剥離した瞬間の荷重を端子の面積で除した値を塗膜の付着力とする。</p>			
			
<p>アドヒージョンテスターの例</p>			
<p><b>適用範囲</b></p> <p>単一塗膜又は多層塗膜系の付着力を評価する場合に実施する。</p>			
<p><b>調査方法</b></p> <ol style="list-style-type: none"> <li>①測定位置をサンドペーパーで軽く研磨して清掃にする。</li> <li>②接着剤を用いて端子を塗膜に貼り付ける。</li> <li>③端子周辺の塗膜にカッターを用いて切り込みを入れる。</li> <li>④専用のアドヒージョンテスターで端子を引き剥がし、そのときの強度（引張力）を記録する。</li> <li>⑤剥離した層とその比率を記録する。</li> <li>⑥剥離した瞬間の荷重を端子の面積で除して塗膜の付着力を求める。 また、塗膜の層間剥離の状況（比率）を確認する。</li> </ol>			
<p><b>評価</b></p> <p>実構造物の単一塗膜または多層塗膜系の付着力を評価することにより、塗膜層の劣化状態を把握する。</p>			

分類	腐食	実態把握分類	腐食
手法	超音波厚さ計（マイクロメーター、ダイヤルデプスゲージ、ストレッチゲージ）		

### 概要（原理）

板の片面から数MHz程度の超音波を接触型の探触子によって入射し、反対面から反射してはねかえってくるエコーを検知してその時間差から板厚を計測する方法。探触子としては、一つの振動子で発振と受振とを行う一振動子探触子が一般的であるが、SN比の改善などを目的として、発振と受振とを異なる振動子で行う二振動子探触子が用いられる場合もあり、一般に腐食鋼板用として市販されているものはこの二振動子探触子を用いたシステムである。



超音波厚さ計の原理

### 適用範囲

- ①塗膜が残っている場合は、塗膜を除去して計測しなければならない。
- ②腐食が進行した鋼板表面をさびが覆っている場合は、超音波の入射が困難である。
- ③腐食によって鋼板表面に凹凸が生じている場合は、探触子と鋼板表面が密着せず測定面を平滑にするための処理が必要となる。  
（表面の凹凸がある場合は、測定結果に誤差を生じ、評価を誤ることがある。）

### 調査方法

表面の凹凸等により、超音波厚さ計での板厚測定に誤差が生ずる場合にはマイクロメーター、ダイヤルデプスゲージ、ストレッチゲージ等による計測を併用するのが良い。

- 1) マイクロメーター：鋼板を挟み込み、直接板厚を測定する計測器。  
計測精度は標準品で0.01mmである。
- 2) ダイヤルデプスゲージ：平坦部に置いて局所的な凹みを測定する計測器。  
測定精度はマイクロメーターと同様。
- 3) ストレッチゲージ：定尺長の平坦なゲージを鋼板面に当て、ゲージと鋼板間の隙間を隙間ゲージ等を用いて凹みを測定する。凸面の場合は、両端に差越用の金具を用いて計測する。

### 評価

腐食による板厚減少（有効断面の欠損）から損傷度合いを明らかにするとともに、腐食橋梁の耐荷力評価を行い、鋼橋の健全度評価を行う。

分類	腐食	実態把握分類	腐食
----	----	--------	----

手法 簡易腐食モニター装置（交流インピーダンス法、電気抵抗測定法）

概要（原理）

1) 交流インピーダンス法

交流インピーダンス法は、正弦波交流に対する電極の応答から電極反応機構を解析する非定常法の一つである。単純な腐食系においては、二つの抵抗（溶液抵抗、電荷移動抵抗）とコンデンサー（電気二重層容量）が組合わされた等価回路（図1）で模擬される。この等価回路はコンデンサーを含むことからインピーダンス値に周波数依存性があり、高周波の時と低周波の時の周波数の差より電荷移動抵抗（腐食速度に反比例する抵抗）を求める方法である。

2) 電気抵抗測定法

電気抵抗測定法の測定原理を図2に示す。

電気抵抗測定法は、モニタリングプローブ供試部の腐食による抵抗値の増加をもとに、腐食速度を求める方法である。

電気抵抗測定法を採用した腐食モニター装置は、計測器本体とモニタリングプローブで構成されており、使用環境や期間によって様々な形状のモニタリングプローブがある。

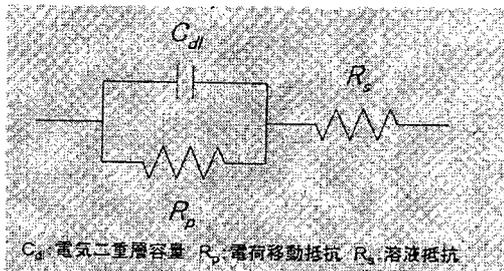


図1 単純な腐食系の等価回路

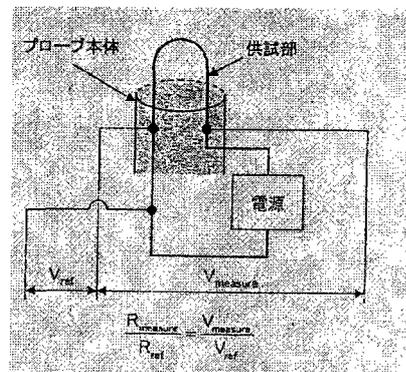


図2 電気抵抗測定法の原理

特徴

- 1) 金属材料の耐食性の評価方法として腐食速度を測定する方法がある。腐食速度のモニタリング方法としては質量減法が最も一般的であるが、データの客観的信頼性が高い反面、適正なデータを得るまでには長時間を要する。これに対し、交流インピーダンス法や電気抵抗測定法は、比較的短時間で腐食速度のモニタリングが可能であり、これらの方法を採用した簡易腐食モニター装置は今や一般的となり、様々な現場で使用されている。
- 2) 電気抵抗測定法は、交流インピーダンス法と比較して環境の変化によって推定精度にバラツキが生じる。

評価

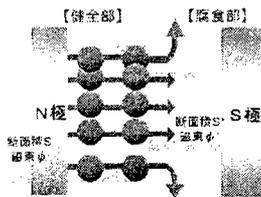
簡易腐食モニター装置を用いて測定した腐食による電荷移動抵抗の変化から、腐食速度換算定数を算出し、通常提案されている値と比較して腐食速度を推定する。

分類	腐食	実態把握分類	腐食（吊橋ハンガーロープ）
手法	全磁束法		

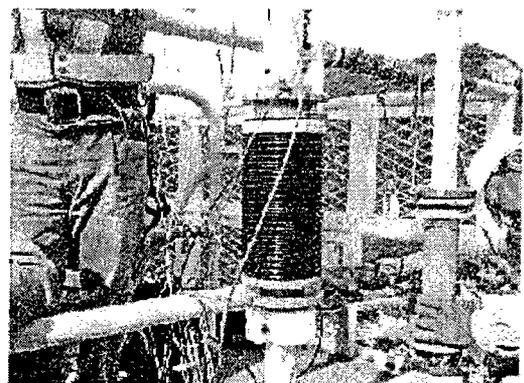
### 概要（原理）

ロープは強磁性体であり、ロープの軸方向に磁化することでロープ中に磁束が流れる。全磁束法は、ロープ中の磁束（ある断面を通る磁力線の数）がロープの断面積に比例することを原理としており、健全部及び腐食部の飽和漸近領域における磁束を測定し、磁束と断面積の比例関係から腐食による断面の減少を評価する非破壊検査方法である。

以下に全磁束法の原理図、測定システム並びに現地計測状況を示す。



全磁束法原理図



現地計測状況



磁化器及び計測システム

### 適用範囲

ロープの非破壊検査方法として主流である漏洩磁束法が素線の断線などの局所的な欠陥に適しているのに対し、全磁束法は腐食や摩耗など広がりを持った欠陥の検査法として有効である。

また、ロープを磁化する方法としては、極間磁化方式やソレノイド方式などがあり、極間磁化方式は磁化装置の着脱は簡単であるが装置が重く、磁化効率も悪い。ソレノイド方式は、現地にてロープの周りに磁化コイルを巻きつけるため、着脱作業に時間がかかるが磁化効率が高いため、装置が軽量・小型となる利点があり、吊橋ハンガーロープの腐食度評価にはソレノイド方式を採用している。

### 評価

磁束を測定することによりハンガーロープの腐食による断面の減少を定量的に判定することができる。

## 2. 1. 3 コンクリート床版の損傷

コンクリート床版を適切に維持管理して行くためには、コンクリートの健全度を適切に評価し、その結果に基づいた有効な対策を施すことが重要である。

従来のコンクリート床版の損傷評価は、床版下面からの目視調査が主体であった。しかし、目視調査ではコンクリートの内部欠陥の把握が困難なことから、既に損傷が進展した段階で欠陥が確認される場合が多く、このため、補修方法や補修費用の面で制約を要する傾向にあった。

従来の方法に加え、コンクリート床版の維持管理を適切に行っていくためにはコンクリート内部の損傷状況を把握できる点検・調査手法が必要である。そして、その結果を用いることにより健全度を正しく評価し、適切な対策を施すことが維持管理上重要である。

一覧表では、こうした維持管理を行っていくためのコンクリート床版の実態把握分類とし「ひび割れ、剥離、空洞の有無」「鉄筋位置、かぶり」「進展・経過」「応力状態」の4項目に分類した点検・調査手法を抽出し、それぞれの概要、精度・信頼性、長所・短所、評価方法をとりとまとめた。

表-1.3 コンクリート床版における点検・調査手法

実態把握分類	点検・調査手法	概要(原理)	精度・信頼性	長所・短所	評価方法	参考文献
ひび割れ、剥離、空洞の有無	目視	コンクリートの表面にできるだけ近接して入念に目視で観察する。	点検員の熟練レベルにより、結果が異なる可能性がある。	コンクリート床版を診断するうえで、最も重要な情報が得られる調査の一つである。コンクリート内部の判断はできないが、表面の状況から損傷の想定が可能である。	ハンマーなどを用いた打音法との併用により、コンクリート表面近傍の浮き、剥離、空洞の有無をある程度把握できる。	JCIコンクリート診断技術'04
	打音法	打撃によりコンクリート中に弾性波を発生させ、この弾性波がコンクリート表面から空气中に放射されたものを測定する。	部材寸法や欠陥深さが2~3m程度の範囲が限度である。	周囲の騒音の影響を受けやすいが、非接触でコンクリート表面の性状に影響を受けにくい、測定が簡便な特徴がある。	可聴域と呼ばれる20Hzから20KHzの周波数域の音を使用する。	JCIコンクリート診断技術'04
	赤外線法	物体表面から放射される赤外線を、検出素子を用いて二次的に走査し、検出された赤外線量を映像として表示する。	測定精度および適用限界が気象条件に左右される。	表面の光沢や汚れにより生じる温度差を欠陥と誤認することがある。	内部に生じた空隙が断熱層となり、日射や気温変化に起因して生じる表面温度の日変動の中で欠陥部と健全部との間に表面温度差が生じる時間帯があることを利用して、内部欠陥を検知する方法。	JCIコンクリート診断技術'04
	弾性波法	コンクリート表面に設置した発振子や衝撃入力装置によって内部に弾性波を発生させ、これをコンクリート表面の受振子で測定し、内部の欠陥の位置や寸法を測定する。	圧縮強度の推定は、反発硬度法と併用することでより精度のより推定が可能である。また、空隙の推定に関しては、比較的大きな空隙であれば、かなりよい精度で推定することが可能である。	周波数の高い弾性波ほどコンクリートの不均質性の影響を受け減衰が大きい。このため、伝播距離で2~3mが限界である。	受振子で捉えた反射エコーや波の周波数、位相などを分析することにより、部材厚さ、内部欠陥や背面空洞の有無、欠陥までの距離などを測定する。	JCIコンクリート診断技術'04
	磁気法	コンクリート中に埋設されている鋼材の導電性および磁性を利用する。	コンクリートの表面近傍(3~5cmが目安)の含水率を計測している。	極めて簡便かつ取り扱いが便利である。	コイルに交流電流を流すことによりコイル周辺に交番磁界を発生させ、それによりコンクリート中に高電流を誘起する。	JCIコンクリート診断技術'04
鉄筋位置、かぶり	電磁レーダー法	電氣的性質の異なる材料の境界や空洞によって反射する電磁波の伝播速度を利用し、材料中の異なる材料あるいは空洞の有無を把握する。	かぶり250mm程度までであれば、10%程度の誤差で測定が可能である。点検者の熟練度によって精度が大きく左右される問題がある。	検査対象物の電氣的性質が変化する場所で使うと、電磁波が水分で反射してしまい正確な把握が難しくなる。	アンテナ(受信・送信)から電波をコンクリート中に発信し、損傷部からの反射を捉えることで、内部情報を非破壊で知ることが出来る。	JSCIE Vol.85 大津政康、土木技術資料16-10 平成16年、日本造船学会誌 第872号 平成15年3月
	電磁誘導法	ファラデーの法則に見られる誘導起電力を利用し、磁性体である鉄筋の位置を把握する。	プローブと鉄筋との距離が大きいと起電力が低下し、鉄筋の検知が困難となる。磁場の変化を検知するため、コンクリートの品質、含水率、コンクリート中の空隙の影響を受けない。	簡易に測定でき、かつ適用実績も多い。	交流磁場を発生させたプローブを検査対象物の表面に沿って直線的に動かす。コイルの起電力の変化から、コンクリート内部の鉄筋の有無や、金属表面における割れなどの傷を検知できる。	土木技術資料16-9 平成16年、鉄道総研報告 Vol.6, No.3 平成14年
進展、経過	自然電位法	コンクリート中の鉄筋が腐食する際の電位の変化を捉えることにより、鉄筋の腐食状態を推定する。	ASTMやBSなど諸外国においても鉄筋腐食の非破壊試験方法として制定されているほか、わが国でも土木学会基準として採択されている。	・環境温度の変化やケーブルの長さに影響を受けない。 ・マクロセル電流を測定する方法に比較して腐食の判定が明確である。	コンクリート中の鉄筋の一部をはりだし、鉄筋に電位差計を接続する。測定するコンクリート表面に照合電極をあて、電位差計により自然電位を読み取る。	土木技術資料16-11 平成16年、日本防食工業株式会社 製品カタログ
	分極抵抗法	コンクリート中の鉄筋が腐食し、イオンを溶出する際の抵抗を測定することによって、鉄筋の腐食速度を推定するものである。	試験基準が確立されておらず、測定装置によって異なる結果を得るといった問題がある。	鉄筋の腐食速度を求め、劣化予測のための有効な情報を与える。	電氣的に負荷をかけた鉄筋の電位を測定することによって、鉄筋の腐食速度を推定する。	土木技術資料16-11 平成16年、日本防食工業株式会社 製品カタログ
	鋼材腐食モニタリングシステム	コンクリート構造物の劣化の進行過程を経時的に監視するモニタリングシステムであり、モニタリングから得られる諸情報により劣化の進行が致命的な段階に達する前に適切な対策を施すことができる。	不導体被膜の破壊は、マクロセル電流1.5μAから開始されるが、肉眼で腐食が確認できるのは15μA以上である。アノード電極を用いた本センサーで計測すると、腐食開始の1.5μAからの測定が可能である。	コンクリート中に埋設されたセンサーからの調査結果を長期に亘り継続的に行うことで、構造物の健全度の経年的な変化を捉え、適切な維持管理を行うことができる。	梯子状に設けられたアノードセンサーの腐食によってたらされる電流の変化を経時的に計測することで、中性化などの劣化進行度を予測する。	土木学会第57回年次学術講演会 1111頁、コンクリート工学 Vol.11
応力状態	光ファイバーによる構造物モニタリングシステム	光ファイバーにパルス光を入射し、その戻り光の周波数からファイバーがひずんだ箇所とひずみ量を測定する。	光ファイバーセンサーは電氣的雑音の影響を受けないことや耐久性が高いことから、構造物のモニタリングとして適したセンサーとして注目される。	・劣化に強い(高耐久性) ・電氣的な誘導ノイズの影響を受けない ・長距離の信号伝送特性 ・電源が不要 ・目的に応じた光ファイバーセンサーを選択する必要がある。	現在、主に実績のある光ファイバーセンサーは4種類である。BODIRでは、ブリルアン散乱光の周波数特性変化からひずみを、戻り時間から位置を計測する。	土木学会第57回年次学術講演会 1111頁、コンクリート工学 Vol.11
	応力測定	道路の任意の測定断面において、測定員を配置し目視調査やビデオ撮影から活荷重のおおよその分布を推定する方法や道路上の荷重センサや格付もしくは床版のたわみ量などから荷重を推定する方法。	高速走行時、複数台の車両などに対しての計測精度に難がある。	計測を行ったわみが微小である場合や、複数台の車両が走行した場合には荷重の特定ができない。	荷重センサなどが、車両の走行による荷重は床版のたわみ量、ひずみ量またはコンクリートに生じている面ひび割れ幅を計測することで、荷重を推定する。	JCIコンクリート診断技術'04
	反発硬度法	コンクリートの表面をテストハンマーによって打撃し、その反発硬度から圧縮強度を求める。	コンクリートの表面状態の影響により、測定結果は大きく異なる。	どのようなコンクリート構造物にも適用可能であり、簡便である。	打撃エネルギーが塑性変形に消費されない場合には跳び返り高さが高くなることよりコンクリートの硬度を計測する。そのコンクリート硬度を介してコンクリート圧縮強度を推定する。	JCIコンクリート診断技術'04

分類	コンクリート床版の損傷	実態把握分類	ひび割れ、剥離、空洞の有無
手法	目視		
<p><b>概要（原理）</b></p> <p>コンクリートの劣化が進行すると、コンクリート表面に損傷が顕在化することが多い。目視調査はコンクリート表面に顕在化した損傷の状態やコンクリート構造物全体の変形状況、構造物周辺的环境状況等を目視観察や簡単な器具などを用いて把握する調査方法であり、コンクリート構造物を診断するうえで、最も重要な情報が得られる調査の一つである。</p> <p><b>適用範囲</b></p> <p>目視調査によって、コンクリートの表面に発生するひび割れ、剥離、鉄筋露出などの発生位置や規模等の損傷状況、コンクリート構造物全体の傾斜や沈下などの変形状況、その構造物が置かれている周辺的环境状況からくる劣化因子等が把握できる。</p> <p><b>目視調査方法</b></p> <p>ひび割れ</p> <ul style="list-style-type: none"> <li>・ 目視観察によるひび割れの発生方向、本数の把握・記録</li> <li>・ ひび割れスケール等によるひび割れ幅の測定・記録</li> <li>・ スケール等によるひび割れ長さの測定・記録</li> <li>・ ひび割れに触れて浮き上がり、段差等の把握・記録</li> <li>・ ひび割れ周囲の打音による浮き・剥離の把握・記録</li> <li>・ ひび割れからの錆汁溶出箇所の把握・記録</li> </ul> <p>剥離、空洞の有無</p> <ul style="list-style-type: none"> <li>・ 目視観察による損傷位置、損傷箇所数の把握・記録</li> <li>・ 損傷周囲の打音による浮き・剥離の把握・記録</li> <li>・ スケール等による損傷の寸法測定・記録</li> </ul> <p><b>評価</b></p> <p>目視調査で把握できた外観上の損傷状況、構造物の変形状況や環境状況から以下の項目について評価する。</p> <ol style="list-style-type: none"> <li>① 緊急対策の必要性</li> <li>② 損傷原因の推定</li> <li>③ 損傷原因を確定するための調査の必要性</li> <li>④ コンクリート内部の損傷状況を把握するための調査の必要性</li> </ol>			

分類	コンクリート床版の損傷	実態把握分類	ひび割れ、剥離、空洞の有無
手法	打音法		
<p><b>概要（原理）</b></p> <p>打撃によりコンクリート中に弾性波を発生させ、この弾性波がコンクリート表面から空气中に放射されたものを測定する。コンクリートの打撃音を利用する打音法も超音波法や衝撃弾性波法と同様に弾性波を用いた方法と考えることができる。</p> <p><b>適用範囲</b></p> <p>通常は可聴域と呼ばれる 20HZ から 20kHz の周波数域の音（弾性波）を使用する。</p> <p><b>特徴</b></p> <p>打音法は衝撃弾性波法と比較して、周囲の騒音の影響を受けやすい難点があるが、非接触で測定可能であるのでコンクリート表面の性状に影響を受けにくい、そして測定が簡便になる、などの長所がある。</p> <p><b>調査方法（振幅分布の測定による方法）</b></p> <p>一定の打撃エネルギーでコンクリート表面を打撃した時に、条件が同一であればほぼ同様な弾性波が発生する。一方、内部に空洞や剥離が存在するような条件の異なる場合には、弾性波の伝播がこれらによって妨げられるために打撃点近傍の受振波の振幅が大きくなる。</p> <ol style="list-style-type: none"> <li>① 剥離が懸念される範囲を選定し、基盤目状に測定点をマーキングする。測定間隔は求めたい剥離寸法を目安に定める。</li> <li>② 打撃点の表面に付着物があればこれを除去する。打撃音で弾性波を取得する場合は、表面の平滑度はあまり問題にならない。</li> <li>③ マイクロフォンをマーキング位置のコンクリート表面に近いところに設置する。</li> <li>④ インパルスハンマーにてマーキング位置を打撃し、弾性波を発生させるとともに、これをトリガーとしてインパルスハンマー出力値および打撃音を波形収録機に取り込む</li> <li>⑤ インパルスハンマー出力値で打撃音入力値を除いたものを振幅比として計算し、各測定点の振幅比から等高線図を作成する。</li> </ol>			

分類	コンクリート床版の損傷	実態把握分類	ひび割れ、剥離、空洞の有無
手法	赤外線法		

### 概要（原理）

サーモグラフィーとは、物体表面から放射される赤外線を、検出素子を用いて二次元的に走査し、検出された赤外線量を映像として表示する方法であり、航空機、プラント、電子基板などの異常発熱部の検出方法として、また、医学における健康診断法の一つとして早くから利用されてきた。

タイル・モルタルの浮き部、コンクリート中のジャンカ、空洞、漏水部等、構造物中に欠陥が存在する場合は、熱伝導率、比熱等、熱的性質が健全部と異なる。健全部と欠陥部の熱的性質の違いは、気温や日射、あるいは人工的な加熱・冷却に起因して生じる構造物の温度変動の中で、表面温度の差となって現れる。土木・建築分野におけるサーモグラフィー法とは、赤外線映像装置を用いて物体の表面温度分布（熱画像）を測定し、熱画像上に現れる表面温度異常部から、内部欠陥の存在を推定する方法である。

### 適用対象

赤外線装置は、一言で言えば、物体の表面温度分布を映像として記録できる温度計であるといえるが、構造物の非破壊検査の分野は、非接触で高速に大面積の測定ができるという長所が活かせるため、橋梁床版については、コンクリート浮き（剥離）の調査に用いられている。

### 調査方法

測定方法は、基本的に写真撮影に似ており、対象物にできるだけ正対した位置から、適切な距離をおいて測定する。写真撮影と大きく異なる点は、本法の測定精度が、測定時の気象条件に大きく左右されることであり、下記の条件が満たされなければ、精度の高い調査は期待できない。

- ① 晴天日に測定すること
- ② 調査対象部分の日射受熱量が最大となる時間帯、あるいは最高気温、最低気温となる時間帯に測定する。

### 精度・適用限界

- ① 測定精度および適用限界が気象条件に左右される
- ② 表面の光沢や汚れにより生じる温度差を欠陥と誤認することがある
- ③ 測定対象物の形状あるいは立地条件によっては、適切な距離あるいは角度からの測定が困難なことがある
- ④ 検出深度は、構造物表面から 5cm 程度が限界である（検出対象欠陥の大きさによる）
- ⑤ 欠陥の深さや空隙の厚さの推定は難しい

分類	コンクリート床版の損傷	実態把握分類	ひび割れ、剥離、空洞の有無
手法	弾性波法		

### 概要（原理）

コンクリート表面に設置した発振子や衝撃入力装置によって内部に弾性波を発生させ、これをコンクリート表面の受振子で測定し、内部の欠陥の位置や寸法を測定する方法。弾性波法は、その利用周波数範囲や弾性波の与え方、受信方法によって、超音波法や衝撃弾性波法などいくつかの手法に分類される。

### 適用対象

ひび割れ、剥離、空洞（コンクリート内部及び背面）を有するコンクリート構造物を対象とする。どのようなコンクリート構造物に対しても適用可能であるが、利用する周波数範囲が高いものはコンクリート中での減衰が大きいため 50kHz 程度以上の高周波数を利用する場合は、部材寸法や欠陥深さが 2～3m 程度の範囲が限度となる。逆に数 kHz 程度以下の低周波数を用いる手法では伝播距離を 10m 以上とすることができるが、測定精度は低下し、検出可能な欠陥の寸法は大きくなる。

### 精度・適用限界

弾性波はすべての固体を伝播するので、理論的にはどのような構造物にも適用可能である。ただし、現実的な適用限界としては、以下のような項目が考えられる。

#### ① 弾性波の減衰による限界

周波数の高い弾性波ほどコンクリートの不均質性の影響を受け減衰が大きいため、超音波を用いた手法では伝播距離で 2～3m が限界である。これ以上の伝播距離を必要とする測定は困難である。

#### ② 周波数による限界

打音法では、測定周波数範囲が 20kHz に限定されている。20kHz の波の半波長はおおよそ 10cm であり、これ以上短い共振が生じる場合には 20kHz 以上の波の発生、受信しなければならないので、通常のマイクロフォンでは測定不可能である。

#### ③ 複数の欠陥が重層している場合

コンクリートと空気の間ではそのエネルギーのほとんどが反射してしまうので、更にその背面に欠陥があったとしても、これを検知することはほとんど困難である。

#### ④ 欠陥の寸法に関する限界

振幅分布を測定して欠陥の有無を判断する場合、欠陥が小さいと評価不能になる。経験的には欠陥の深さと同等以下の寸法の欠陥検出は困難である。

#### ⑤ 欠陥の形状による限界

欠陥の形状が複雑なために共振周波数が生じないようなことは多くある。このような場合には明確な卓越周波数が存在せず評価が困難になる。

分類	コンクリート床版の損傷	実態把握分類	ひび割れ、剥離、空洞の有無
手法	磁気法		

### 概要（原理）

電磁波レーダー法は、コンクリート構造物内の埋設物およびコンクリート性状（躯体厚・空洞など）の調査方法の一つであり、取り扱いが簡単、かつ短時間で広範囲の調査が可能であり、特別な資格・免許等を必要とせず、すぐに結果が得られる手法である。しかしながら、簡便な手法ゆえに作業者の技量や経験に依存するところの多い手法でもある。

### 適用範囲

電磁波レーダーは、比較調査（異物調査）の装置であり、その点から言えば、ひび割れ・剥離・空洞の調査が可能である。しかしながら、市販されている装置で使用されている周波数帯では、躯体厚および空洞の調査に限られると言ってよい。一部条件によっては、ひび割れ・剥離の検出が可能と言える。

### 調査方法

電磁波レーダーは、探査対象との電気的性質の違いから発生する反射波の移り変わりを見る装置である。したがって、計測されたデータからその形状や材質を判定することはできない。しかしながら、比較探査が可能なこの手法は、構造物内部の事前情報と技術者の構造に関する知識によって内部状況の推定が可能である。

### 精度・適用限界

#### ① 測定精度

電磁波レーダの精度は、平面的位置の測定精度と深さ方向の位置測定精度に分けられる。平面的位置の測定精度については、コンクリート性状調査においては影響が少ないので深さ方向の位置測定精度について示す。深さ方向の位置精度は、電磁波の伝播速度の推定精度に依存する。電磁波の伝播速度は比誘電率によって決定され、その推定手法には下記のようなものがある。

微破壊検証法、ワイドアングル法、カーブフィティング法・三角法、直接波法

#### ② 適用限界

比較調査の装置である電磁波レーダは、探査対象であるコンクリートが均一でないため、定量化できるデータが少ない。そのため、現在利用されている用途の多くが位置情報のみに限られている。他の手法との複合探査による今後の可能性に期待されるが、現状では調査する技術者の事前調査、技量による適用の広がりしか考えられない。

したがって、現状のコンクリート性状調査では、躯体厚および空洞調査以外では、目視、打音およびボーリング調査等の結果から確認できるものの範囲の測定が限界である。

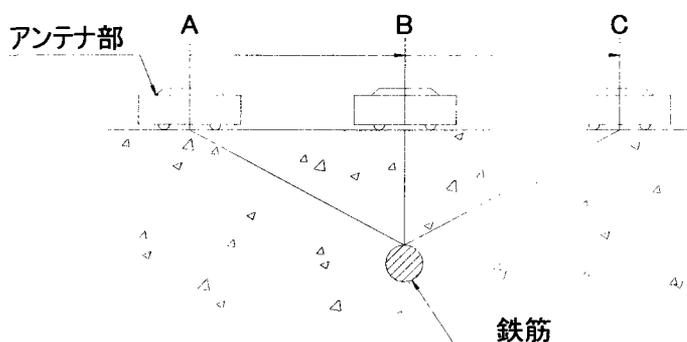
分類	コンクリート床版の損傷	実態把握分類	鉄筋位置、かぶり
手法	電磁レーダー法		

### 概要（原理）

電氣的性質の異なる材料の境界や空洞によって反射する電磁波の伝播特性を利用し、材料中の異なる材料あるいは空洞の有無を把握する。

＜かぶり測定を例とした解説＞

- ① アンテナ送信部から放射された電磁波をアンテナ受信部でキャッチすると、受信部では、入射直後の電磁波と、少し時間をおいて鉄筋で反射した電磁波を記録する。
- ② アンテナ送受信部を A 点から C 点まで移動させると、2つの電磁波の伝播時間は、アンテナが鉄筋の直上に位置したときに最小値として計測される。この最小値を電磁波伝播速度で除することにより、かぶりを求めることができる。



### 適用対象

コンクリート構造物内部に配置された鉄筋位置の確認、浮き剥離の有無、かぶりの測定などを調査するのに適用される。データは、現地での簡易解析で緊急性のある箇所のチェックを行うとともに、後で専用のコンピュータにより各種の波動を解析し正確な状況を評価する。測定が簡便で実績も多い。

### 精度・適用限界

- ① かぶり 250mm 程度までであれば、10%程度の誤差で測定が可能である。
- ② 内部鉄筋が複雑に配置されている場合、深部にある情報は得られ難い。
- ③ コンクリート内部の鉄筋径の影響を受けずにかぶり測定が可能である。
- ④ 調査結果をビジュアルに示せることに加え、記録を残せる。
- ⑤ 漏水の多いトンネルなど検査対象物の電氣的性質が変化する場所で使うと、電磁波が水分で反射してしまい、欠陥を検知できない。そのため、材料の含水状態に応じた比誘電率を適切に設定してから測定することが必要である。
- ⑥ 計測者の熟練度によって精度が大きく左右される問題もある。

分類	コンクリート床版の損傷	実態把握分類	鉄筋位置、かぶり
手法	電磁誘導法		
<p><b>概要（原理）</b></p> <p>ファラデーの法則に見られる誘導起電力を利用し、磁性体である鉄筋の位置を把握する。</p> <p>電磁誘導法の測定装置では、コイルの巻かれたプローブに交流電流を流し、交流磁場を発生させ誘導電流を生じさせる。すると、磁性体である鉄筋はプローブによる磁場に反発する磁場を発生させる。この磁場の変化を検出することによって、鉄筋の位置を把握する。</p> <p><b>適用対象</b></p> <p>コンクリート構造物内部のかぶり測定、金属板など導体に生じた割れ等の傷の検知</p> <p><b>調査方法</b></p> <p>プローブをコンクリート表面に沿って直線的に動かし、最大の起電力が生じたときの磁場の変化を測定する。</p> <p><b>精度・適用限界</b></p> <ol style="list-style-type: none"> <li>① プローブと鉄筋との距離が大きいと起電力が低下し、鉄筋の検知が難しい。</li> <li>② 測定する鉄筋の近傍に別の鉄筋がある場合、その影響を受ける場合がある。 次のいずれかの条件にあてはまらない場合、かぶり測定が困難となる。 <ul style="list-style-type: none"> <li>・ 鉄筋径は 6mm 以上の場合で、かぶりは 200mm 以内</li> <li>・ 鉄筋間隔 100mm 以上、かつ、かぶりよりも大きいこと</li> </ul> </li> <li>③ 発電所、電車の路線上など、強力な磁界が存在する場所で測定を行う場合や、コンクリート中に鉄筋以外の磁性体が存在する場合には、測定結果に影響が生じる。</li> <li>④ コンクリートの品質、含水率、かぶりコンクリート中の空洞の影響を受けない。</li> <li>⑤ コンクリート表面が塗膜などで被覆されている場合にも、その材質が磁性体でない限り影響を受けない。</li> </ol>			

分類	コンクリート床版の損傷	実態把握分類	進展・経過
手法	自然電位法		
<p><b>概要（原理）</b></p> <p>自然電位法は、鉄筋が腐食する際の電位の変化を捉えることにより、鉄筋の腐食状態を推定するものである。</p> <p>中性化などによってコンクリート内部の鉄筋周辺のpH値が11.5を下回ると、不導体被膜が破壊に至り、腐食が進行される。このように、鉄筋の腐食反応が活性化すると、鉄筋に示す電位も変化するため、この変化を捉えることによって、鉄筋の腐食状況を推定するものである。</p> <p><b>適用対象</b></p> <p>コンクリート中の鉄筋の腐食</p> <p><b>測定装置</b></p> <p>自然電位の測定装置は、①照合電極、②電位差計、③測定対象となる鉄筋および照合電極～電位差計間を接続するリード線から構成される。電位差計は、内部抵抗が大きいものが好ましく、100MΩ以上の内部抵抗を有する機器の使用が推奨される。</p> <p><b>調査方法</b></p> <p>照合電極と電位差計を接続するとともに、コンクリート中の鉄筋の一部をはつりだし、鉄筋に電位差計を接続する。測定面のコンクリートを散水により湿潤状態にし、測定対象となる鉄筋直上のコンクリート表面に照合電極をあて、電位差計により自然電位を読み取る。</p> <p><b>精度・適用限界</b></p> <p>自然電位法は、以下に示す条件下では適用できない。</p> <ol style="list-style-type: none"> <li>① コンクリート表面が非常に乾燥し電氣的に絶縁状態に近い場合</li> <li>② コンクリート表面や鉄筋表面が絶縁材料で覆われている場合（エポキシ樹脂塗装鉄筋等）</li> <li>③ 水中構造物のようにコンクリート表面が水で覆われている場合</li> <li>④ 使用する照合電極によって測定される自然電位も異なるなどの問題もあり、鉄筋腐食の判定結果をより確実にしたい場合には、コンクリート中の塩化物イオン含有量や中性化深さの測定も合わせて実施する必要がある。</li> </ol>			

分類	コンクリート床版の損傷	実態把握分類	進展・経過
手法	分極抵抗法		

### 概要（原理）

分極抵抗法は、鉄筋の腐食速度を推定することを目的とした非破壊試験方法である。

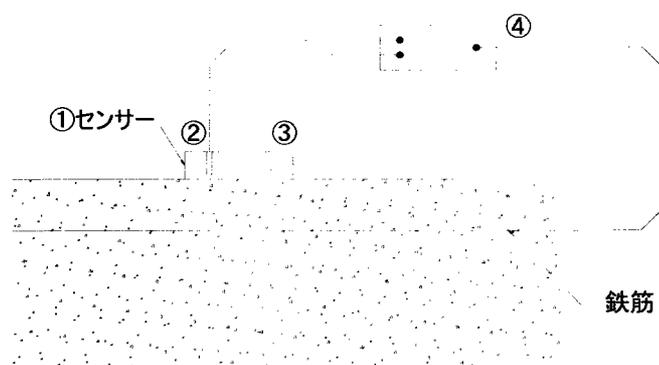
鉄筋の腐食は鉄がイオンとして溶け出す化学反応の一つであり、分極抵抗法では、鉄がイオンとして溶け出す際の抵抗を測定しようというものである。

電位を測定する点は自然電位法と共通である。しかし、分極抵抗法は鉄筋腐食の速度を直接とらえるものであり、コンクリート中の鉄筋腐食を判断する自然電位法とは異なる。

### 適用対象

コンクリート構造物中の鉄筋の腐食速度

### 測定装置



測定装置の様式図

上図は測定装置の概要を示したものである。

1. ①測定箇所センサーを置く、このセンサーは②対極と③照合電極がある。
2. ②対極を通じて鉄筋に微小電流を負荷する。同時に鉄筋電位の変化を③照合電極でとらえる。
3. ④は①対極の制御ならびに②照合電極でとらえた電位を測定する装置を表す。

### 精度・適用限界

- a. 分極抵抗法は電氣的に負荷をかけた鉄筋の電位を測定するため、自然電位が正確に捉えられることが適用条件となる。
- b. 分極抵抗法は鉄筋の腐食速度を求め、劣化予測のための有効な情報を与えるものであるが、試験基準が確立されておらず、用いる装置によって異なった試験結果が得られるという問題もある。

分類	コンクリート床版の損傷	実態把握分類	進展・経過
手法	鋼材腐食モニタリングシステム		

### 概要（原理）

コンクリート構造物の劣化の進行過程を経時的に監視するモニタリング・システムであり、モニタリングから得られる諸情報により劣化の進行が致命的な段階に達する前に適切な対策を施すことができる。

### 適用対象

コンクリート構造物中の鋼材および鉄筋の腐食状況から中性化の進行度を測定

### 測定装置および原理

50mm 間隔で 6 本の電極を梯子状に配置したセンサーをコンクリート中に埋設し、塩化物イオンの浸透やコンクリートの中性化に起因したセンサーの腐食を経時的にモニタリングする。

センサーの鋼材が発錆などに対して健全であれば電極に流れる電流は無視できるほど小さい。しかし、中性化等により不導体被膜が破壊され局部電池が形成されると腐食電流が観測される。これを経時的に観測することで、中性化深さなどの特性値に関連した鋼材腐食の危険性を予測することが可能となる。センサーの外観（図-1）と設置状況を（図-2）に示す。

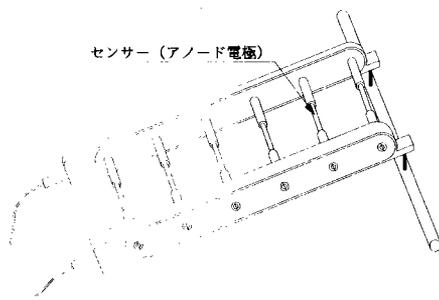


図-1 アノード・ラダー・システム

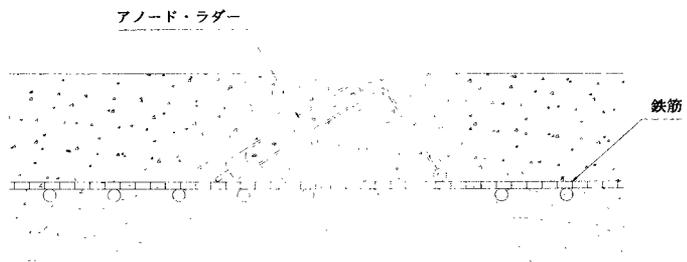


図-2 設置状況

### 精度・適用限界

- ① 鋼材腐食の限界電流値(1.5  $\mu$ A)から画像で確認できる。
- ② 最大 1000 個の計測データが保存でき、接続したシリアルポートによりパソコンへの伝送も可能である。

分類	コンクリート床版の損傷	実態把握分類	進展・経過
手法	光ファイバーによるモニタリングシステム		

### 概要（原理）

光ファイバーにパルス光を入射して、その戻り光の周波数からファイバーがひずんだ箇所とひずみの量を測定する。入射したパルス光は、ファイバー内で散乱し、入射した端に後方散乱光として戻る。光ファイバーの伸縮でひずんだ箇所から来る後方散乱光は、伸縮が無い箇所から来る散乱光と異なる。異なった周波数の散乱光が戻る時間から、ひずみが生じた箇所を特定する。

### 適用対象

コンクリート構造物のひずんだ箇所およびひずみ量

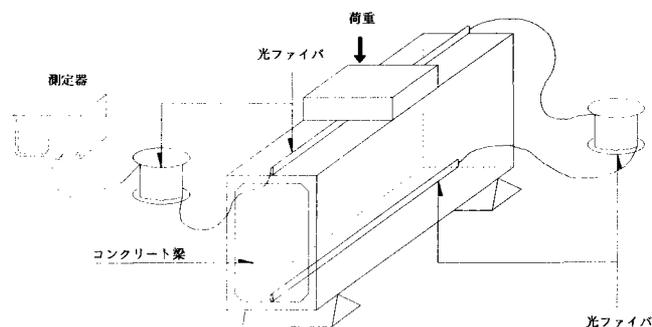
### 測定装置

コンクリート構造物に数メートルの光ファイバーを取付け、構造物の挙動をリアルタイムでモニタリングするシステムである。国内で使用実績のある光ファイバーセンサーは、分布型、多点型、広域型の4種類であり、その目的に応じた光ファイバーセンサーを選択する必要がある。

分布型：距離分解能が1mと十分に細かくないことから、連続的に変化するひずみ分布を示す。

多点型：計測点がひび割れ上にあれば大きなひずみを示し、ひび割れ以外の位置にあれば顕著なひずみを示さない。

広域型：2点間の長さ変化を計測するので、その区間の平均ひずみを示すことになる。



### 精度・適用限界

- ① 従来のひずみゲージなどにより、“点”で監視していた構造物の変形を本手法では“線”で監視できる。
- ② 現在使用されている光ファイバーセンサーはひずみセンサーあるいは検長の長い変位センサーであるため、ひび割れのような局所的な変位を直接計測することは困難である。
- ③ 現状では、光ファイバーセンサーによって損傷の有無と発生した概ねの位置を検知し、その位置について詳細な検査を行うのが有効な方法であると考えられる。

分類	コンクリート床版の損傷	実態把握分類	応力状態
手法	応力測定		
<p><b>概要（原理）</b></p> <p>応力測定の方法としては、交通流調査方式や接計量方式・間接計量方式などがある。</p> <p>① 交通流調査方式</p> <p>交通流調査方式では、一般に道路の任意の測定断面において、点検員を配置した目視調査やビデオ撮影を行い、テレビ画面上で速度、車種区分等の必要事項を集計して、車種に応じた車両重量を当てはめて活荷重のおおよその分布を推定する方法である。センサ等で幅広く用いられている方法であり、直接計量方式、間接計量方式においても基礎的かつ必要な調査方式である。</p> <p>② 直接計量方式</p> <p>直接計量方式は、荷重センサーを道路上に設置して、直接的に計測する方法であり、一般に交通流調査方式と併用して行われている。計測に用いるセンサーとしては、ひずみゲージ式のロードセル、静電容量方式の可搬式マットなどが用いられている。有料道路などにおいては、重量違反車両への警告を目的として、料金所にひずみゲージ式による計量機器が設置されている場合もある。直接計量方式の問題点としては、高速走行時の計測精度に難があること、走行位置や車種判別の計測が別途必要になることが挙げられる。</p> <p>③ 間接計量方式</p> <p>間接計量方式は、車両の走行による桁もしくは床版のたわみ量、ひずみ量またはコンクリートに生じている曲げひび割れ幅を計測することで、荷重を推定する方法である。いずれの場合も、橋梁の曲げ剛性が既知で、走行している車両の軸数や車輪位置が記録され、かつ、たわみ量等の指標との相関が高いことが必要となる。</p> <p>特にたわみ量は、間接計量方式としてはよく用いられる指標である。間接計量方式の問題点としては、たわみ等の量が微小であること、複数台の車両が走行した場合に荷重の特定ができないことが挙げられ、走行位置や車種判別の計測が別途必要になる。</p> <p>④ 交通流自動観測システム</p> <p>交通流自動観測システムは、交通荷重計測手法を組み合わせ、荷重計測の自動化を目的として開発が進められている計測システムである。</p>			

分類	コンクリート床版の損傷	実態把握分類	応力状態
手法	反発硬度法		
<p><b>概要（原理）</b></p> <p>コンクリートの表面をテストハンマーによって打撃し、その反発硬度から圧縮強度を求める方法を「反発度法」または「反発硬度法」という。我が国では（社）日本材料学会でその試験方法の規準が制定されたのをはじめとして、（社）日本建築学会、（社）土木学会等にも試験方法に関する規準が示されている。コア採取によるコンクリート強度測定と比較して試験方法が簡便なこと、構造物を破壊することなしに測定できることから</p> <ol style="list-style-type: none"> <li>① 詳細調査を実施する前の予備試験</li> <li>② 何らかの理由でコア採取による強度試験が困難な場合</li> <li>③ コンクリート強度分布など、多くの箇所での強度推定が必要な場合</li> <li>④ コンクリートの材齢に伴う強度増進を確認したい場合</li> </ol> <p>等に用いられる。</p> <p><b>適用対象</b></p> <p>本方法は、型枠支保工解体時など新設コンクリート構造の強度管理や既設コンクリート構造の強度推定に用いられる。どのようなコンクリート構造物にも適用可能であるが、打撃時の反発の程度をもって強度推定を行うので、打撃力が逸散するような箇所や状態では測定が困難になる。測定可能なコンクリート強度の範囲は使用する測定機器によって異なるが、および <math>10\sim 60\text{N/mm}^2</math> が本手法の適用可能な範囲とされている。</p> <p><b>原理</b></p> <p>テストハンマーにより一定のエネルギーでコンクリート表面を打撃したときに、テストハンマーの跳ね返り高さ（反発度）とコンクリートの硬さ（ブリネル硬度）およびコンクリートの強度には相関があることがこれまでの研究で明らかにされている。これによれば、跳ね返り高さは打撃によって生じるコンクリートのくぼみの程度と関連しており、くぼみが大きいほど跳ね返り高さが低く、硬度は小さな値となる。</p> <p><b>精度・適用限界</b></p> <p>測定精度に影響を及ぼす要因の例として、コンクリート表面の乾湿による影響、コンクリート表面の粗度による影響がある。反発硬度法は、これら以外にも使用骨材、骨材寸法、配（調）合、施工、環境条件など、多くの影響を受けるために、できる限りコアを採取して実強度との比較や表層コンクリートと内部コンクリートの差異の観察を行うことが望ましい。コアの採取ができず、既存の推定式を用いる場合においては、測定結果を過信しないことが重要である。このような場合には、弾性波法等、他の方法を併用することによって、得られた結果が妥当であるかを検証することが望ましい。</p>			

## 2. 2 点検・調査による既設橋の実態把握評価手法とその適用性

鋼橋の変状（劣化現象および劣化機構）における大半を占める疲労き裂、腐食、コンクリート床版の損傷について、その点検・調査手法とそれにより既設橋の実態を把握し評価する手法の適用性についてまとめてみた。

劣化現象（疲労き裂、腐食、床版コンクリートの損傷）ごとに損傷の5段階評価を示し、各点検・調査手法により得られる結果で、どのレベルの段階評価が可能であるか（何をどの程度判断または評価することが出来るか）、をまとめることで、各種調査・点検手法の活用方法に対するひとつの提案となるのではないかと考えた。

## 2. 2. 1 疲労き裂

表-1.4に疲労き裂の5段階評価を、表-1.5に各種疲労き裂点検・調査手法の適用性を示す。

表-1.4では、潜伏期から劣化期の損傷レベルに対応する通常の5段階評価と、劣化状態以外を把握する調査手法を識別する目的で評価段階0（劣化予想・原因推定）を設けた。

き裂検出手法としては、もっとも一般的に行われている磁粉探傷試験が精度的にも優れており、追跡点検を行うことで進展状況も正確に掴むことが可能で、き裂単体の劣化段階の評価を行うという観点からはもっとも優位な手法と考えられる。ただし、着目したき裂単体の評価であり、これらのき裂が橋梁全体にどの様に影響し、橋梁全体がどのような状態にあるかどうかなどを把握、評価するためには、全損傷箇所に対する追跡調査や別途応力測定を行うなどが必要である。

近年、現場調査においても多く採用されはじめてきた超音波探傷試験は、基本的に内部欠陥、溶込み不良の有無などの内部状況を推定することも目的としており、ここで言う劣化段階を定量的に評価することは困難と考えられる。超音波探傷方法については、新しい探傷機器や探傷手法が多く開発、提案されており、どのような機器、手法を用いるかにより今後更なる採用が増えてくるものと思われる。しかし、今だその使用およびデータの解析に際しては高度な知識、経験が必要であり、簡易に定量的な評価が行えるような改善・改良が必要と思われる。

光ファイバーケーブルによるモニタリングは、連続した光ファイバーケーブルを使用することで、今まで点でしか評価できなかったき裂を、線または面として監視、調査、評価出来る可能性を秘めており、今後更なる研究・開発が望まれる。

表 - 1.4 疲労き裂の5段階評価

評価段階	劣化過程	定義	状態	備考
5	潜伏期	き裂発生までの疲労蓄積期間。	外観上の変化はほとんど見られない。	
4	進展期	微小なき裂の発生、進展期間。 ルートき裂などでは表面に現れるまでの期間。	塗膜割れ、錆汁の発錆などによりき裂が見つかる。 ルートき裂などにおいては表面上まだ変化は見られない。	
3	加速期 (前期)	巨視的なき裂の進展（微小→巨視）。 ルートき裂などではき裂が表面に現れ進展する過程。	目視によりき裂の存在がはっきりと確認される。活荷重によりき裂が開口している様を確認される。	
2	加速期 (後期)	巨視的なき裂が進展し板厚を貫通、成長していく過程。 き裂部位によっては部材剛性に影響を与えたり、脆性的に破壊する恐れもある。	かなり大きなき裂がさらに進展する恐れのある状況。	供用制限（き裂位置による）
1	劣化期	き裂発生部位により部材の破断等が生じ、部材剛性、耐荷力の低下を生じる過程（拘束応力などが原因の疲労き裂においては、拘束応力が開放されき裂の進展がストップする場合もある）。	き裂の進展により部材の破断やたわみの増加、異常な振動などが生じる状態。	供用限界（き裂位置による）
0	-	劣化予測 原因推定	-	基本的に加速期以前の状態が対象。

表-1.5 各種疲労き裂点検・調査手法の適用性

点検・調査手法	概要	判定可能な評価段階と評価手法		備考	
		評価段階	評価手法		
き裂検出	目視調査	近接目視により塗膜割れなどからき裂発露の有無を調査する。	4~1	主に塗膜割れからき裂の有無を調査し、その大きさ、数量、状況から総合的に評価する。加速期前後の判別は困難。	塗膜割れからの判断のため、最終的には非破壊試験による確認が必要。点検員の技量による差が生じやすい。
	超音波探傷試験	金属中に超音波を入射し、き裂や異物などの不連続面から帰ってくる反射波の伝播時間差、エコー高さなどから内部状況を調査する。	0, 4, 5	種々の探傷手法による反射源の位置、エコー高さなどにより内部の状況を総合的に判断し、欠陥の有無、劣化予想などを評価する(定量評価が可能)。基本的に表面欠陥には適用されないが、探傷手法によりき裂深さなどを評価することも可能。加速期から劣化期のき裂においては内部状況を調査することで原因推定の評価に使用される。	フェイソアライ、10連探触子などの新しい探傷機器とともに、探傷手法(探触子)にも斜角、直射、TOFD、SH、クリビングなどの各種の手法があり、どの探傷手法を行うかまた組み合わせで行うかなど、かなりの知識と技能が必要。実橋における適用としては内部状況の調査による原因推定、劣化予想などに用いられることが多い。
	磁粉探傷試験	き裂箇所を磁化し、蛍光色、黒色などの磁粉がき裂箇所に着させ、き裂の有無、寸法を調査する。	4~2	き裂先端をある程度の精度で捉えることが可能であり、追跡調査によるき裂の進展度により4~2の評価がある程度可能。	点検員の技量による差が生じにくく、き裂検出、き裂寸法などの精度は比較的高い。
	渦流探傷試験	渦電流を対象物に発生させ、き裂の有無による渦電流の変化を測定することでき裂を検出する。	5, 4	き裂の有無のみを検出。どの劣化過程にあるかの判別は困難。	塗膜の上からも適用可能であり簡易な手法であるが、適用箇所の形状や材質による影響も受けやすく、判断にはある程度の技量が必要。
応力測定	光ファイバー	ファイバーケーブル内の散乱光の検出によりケーブルに加わったひずみや屈曲、温度を検知する。連続した区間の計測や特定部位の検出も可能。	5~0	連続性のある光ファイバーセンサーにより永久変形をモニターすることで、加速期(段階2,3)、劣化期(段階1)の評価が可能であり、き裂の発生前から監視すれば潜伏期から進展期(段階5~4)の評価も可能となる。また、限定した箇所に対して動的ひずみを計測し、累積損傷度を算定すれば疲労き裂に対する段階0(劣化予想)の評価を行うことも理論上可能。	潜伏期から劣化期への評価は継続的なモニターを行うことで可能となる。光ファイバーセンサーにも数種の種類があるが、ハードおよびソフト的にまだ高価であり、その評価手法についても今後さらに検討が必要と考えられる。
	実働応力頻度計測	ひずみゲージなどによる応力計測結果から、乱数的に発生する応力を頻度分布として分解し、累積損傷則により疲労損傷度を推定する。	5, 0	変動応力を頻度分布として分解し、継手の強度等級に応じたS-N線図により、各応力範囲ごとにその度数による疲労被害量を算出、マイナー和により計測期間の総疲労被害量を推定する。ある計測期間の疲労被害量により疲労寿命を推定することで(1/疲労被害量)、劣化予想(段階0)の評価が可能。	一般的に、あらかじめ設定されたプログラム(レインフロー法など)に従って測定と同時に測定データをデジタル処理、解析処理を行ってカウント数を記録する応力頻度計によることが多い。頻度データのみでなく最大応力範囲などのデータも得ることが可能。
	犠牲試験片(疲労履歴センサー)	非常に鋭い人工き裂などを設けた試験片(疲労センサー)を構造物に固定し、人工き裂などの進展長さを計測することにより、間接的にその構造物が測定期間において受けた疲労損傷度を推定する。	5, 0	センサーに設けられたヒューズ箇所の変化(人工き裂の進展長など)と疲労損傷度との関係が明らかとなっていることから、実橋にセンサーを設置した期間とその期間での人工き裂などの進展長を計測することで、疲労損傷度の推定が可能であり、段階0(劣化予想)の評価が可能。	実働応力頻度計測による疲労損傷度の推定に特化したセンサーのため得られるデータは少ないが、その多くは現場での計測装置などが不用で非常に簡易に計測することが可能であり、また温度変化や電磁ノイズの影響を受けにくい。
調査支援・監視	き裂検出塗料	染料入りのマイクロカプセルを含んだ塗料をき裂の恐れのある箇所に塗布し、き裂による塗膜割れが生じた場合その視認性を向上する。	5, 4	目視により染料の浸み出しの有無により塗膜割れを評価。最終的なき裂評価は別途必要。目視点検の支援ツールとして使用。	使用実績が少ないが、箱桁内などの目視が困難な箇所の目視点検支援ツールとしては有効な可能性が高い。
	クラックゲージ	き裂の発生が予想されるまたは既に発生している箇所に貼付け、あるピッチで配置されたグリッドがき裂の発生、進展により破断され抵抗値が変化することで、き裂の進行長さや伝播速度を計測する。	5~1	モニターすることで、き裂の発生から進展経過までを監視、計測することができ、段階5(潜伏期)から段階4(進展期)の評価が可能。また、き裂伝播速度を引き続きモニターすることで段階3(加速期)から段階1(劣化期)の評価も可能となる。	モニターすることで各段階の評価が可能であり、モニターの設備、システムが必要。
	CCDカメラ	超小型カメラによりアプローチ困難な箇所の点検やき裂進展を監視する。	5, 4 4~2	点検支援のツールとしてはアプローチ困難な箇所のき裂の有無(段階5および段階4の状態)を評価可能。実際にき裂が発生している箇所に対してCCDカメラを設置し、き裂の進展を監視することで段階4(進展期)から段階2(加速期)の評価を行うことも可能。	クラックゲージと同様に、モニターすることで段階4から段階2の評価が可能となり、モニター設備、システムが必要。
その他	スンプ試験	部材を破壊することなく金属面のレプリカを採取し、金属組織などの観察を行う。	0	ETCHINGした金属表面のレプリカを採取し、光学顕微鏡を用いてレプリカの金属組織状態、き裂の状態(先端の鋭さや進展過程)などを観察する。	ほかの調査と併用して実施することで、段階0(原因推定、劣化予想)の評価を行う一資料として有効。
	マクロ試験	溶接部に発生したき裂箇所をETCHINGし、き裂近傍の熱影響状態、き裂位置の金属組織を観察する。		着目箇所の研磨後、ニッケルエッチング(硝酸による腐食)し、熱影響程度(金属組織の違い)による腐食作用の差により生ずる陰影から、溶接金属部、熱影響部、母材の範囲、き裂発生位置等を観察する。	
	材料分析	試料を採取し、原材の化学成分などの分析を行う。		未知の材料に対して化学成分を分析することで鋼種の推定や溶接割れ感受性などを評価する。	

## 2. 2. 2 腐食

表－1.6に腐食の5段階評価を、表－1.7に各種腐食に関する点検・調査手法の適用性を示す。

表－1.6では、き裂と同様に潜伏期から劣化期の損傷レベルに対応する通常の5段階評価と、劣化状態以外を把握する調査手法を識別する目的で評価段階0（劣化予想・原因推定）を設けた。

腐食という損傷を、塗膜の劣化状態を潜伏期として、腐食減厚による耐荷力の低下が生じる状態までを5段階に分け、それぞれの段階を評価できる。またはそれぞれの段階で適用される調査手法について検討した。

一般的に腐食というと、5段階評価のうち鋼材に断面減少が見られてくる3段階（加速期）以降の現象を指すものと考えられるが、それらの段階になった腐食損傷を定量的に調査し既設橋の実態を正確に評価できる方法は極端に少ないのが実状である。

腐食減厚量を実橋にて調査する手法として、超音波板厚計による板厚測定などが行われる。板厚測定自体は、計測値は正確であり、原板厚との差により腐食減厚量が定量的に調査出来る手法であるが、それは計測した箇所のみでの評価である。一様に減厚が生じるような腐食現象は実橋においてはまず希であり、クレーター状に凹凸が生じ局部的に孔食などが生じているのが一般的な症状ではないかと考えられ、これらの状態を点で計測したデータからどの様に評価し、実態を把握するかについては今後も検討が必要と考えられる。

腐食の潜伏期、進展期である塗膜劣化、発錆においても、その状態を定量的に評価できる手法は少ない。従来の塗膜劣化現象を評価する手法は、基本的に目視観察による総体的な塗膜の変状を調査する現場調査法が主流である。ただし、目視による外観調査は容易である反面、調査の熟練者であっても経験の差や主観により、評価結果に大きなバラツキが生じる。

このような不具合を解消し、鋼橋の塗装に対する健全度評価を行うために、画像処理による評価手法が提案されている。8mmVTR または CCD カメラを用いて検査対象となる塗膜面を撮影し、その画像情報から得られる数値を塗膜劣化基準と照らし合わせることで評価を行っている。評価手法に至る一連の作業は自動化されているところがこのシステムの大きな特徴である。

また、塗膜劣化現象を遠隔モニタリングして評価する手法として、腐食モニター（ACM型腐食センサー）がある。ACM型腐食センサーの出力データ（腐食電流）と環境条件（温度、湿度、付着海塩量）との良好な相関性が見出されており、架橋地点における大気腐食環境から塗膜の劣化状態を判断するシステムとしての可能性がある。しかし、実橋の腐食モニタリングとしては、腐食の速度は部位によって大きく異なること、さらには溶接部と母材とでは劣化状況が異なることなどから、実構造の塗膜劣化・発錆状況を判断するには、さらなる研究開発が必要である。

表-1.6 腐食の5段階評価

評価段階	劣化過程	定義	状態	備考
5	潜伏期	鋼材の発錆はほとんど無く、塗膜の劣化が進行している過程。	塗膜表面上に錆はほとんど見られないが、塗膜の光沢減少、チョーキングが顕著になり、上塗塗膜が消失している。	
4	進展期	塗膜表面に点錆が発生し、それが少しずつ増加する過程。	点錆、塗膜のひび割れ・はがれが部分的に発生。	
3	加速期 (前期)	鋼材の腐食量が顕著になり、断面減少が生じる過程。 腐食量が指数曲線で進行する期間。	腐食により鋼材の断面減少が見られる。	
2	加速期 (後期)		ほぼ全面的に錆が発生しており、孔食も見られる。	供用制限
1	劣化期	鋼材の腐食による耐荷力（静的、座屈等）に低下が生じてくる期間。	腐食が非常に進行し、孔食もかなり発生している。腐食量は板厚の1/2以上に達する部位も見られる。	供用限界
0	-	劣化予測 原因推定	-	基本的に加速期以前の状態が対象。

表-1.7 各種腐食点検・調査手法の適用性

点検・調査手法	概要	判定可能な評価段階と評価手法		備考
		評価段階	評価手法	
塗膜劣化ほか調査	目視点検	5~1	塗膜の劣化度や発錆程度については、劣化標準写真などの対比により各段階の評価が可能。段階3(加速期)~段階1(劣化期)の評価はほかの調査を併用しないと定量的な評価は困難。	容易である反面、経験の差や主観により、評価結果に大きなバラツキが生じる。
	画像処理	5~4	塗膜面の画像を処理して得られる数値を塗膜劣化基準と照らし合わせることで塗膜劣化度(潜伏期から進展期)を評価する。評価手法に至る一連の作業はシステム化されているため定量的な評価が可能。	基本的に塗膜の劣化が対象であり、腐食に至っている様な場合は対象外。
	剥離試験	5	基盤目試験：剥離の見本と実際の剥離状態を比較して、評価点として評価。 アドヒージョン試験：アドヒージョンテスターにより塗膜面に貼り付けたテスターを引きはがし、その時の引張力を記録する。	基本的に塗料規格としての付着力を試験するものであり、この結果から現場塗装の劣化度を定量的に評価するには検討が必要。
	色差・光沢測定	5	変色・退色、光沢度を定量的に測定し、塗膜の劣化を評価する。	数値的には定量的に現れるが、塗膜劣化との関係については検討が必要。
板厚測定	超音波板厚計やキャリパーなどを使用して、板厚を計測し、発錆・腐食による減厚量を調査する。	3~1	減厚量を明らかにし、応力的な余裕度を検討することで、その程度により段階3~1(加速期から劣化期)の評価が可能。	一般的に板厚測定は点での計測となるため、孔食などの局所的な腐食、腐食面の凹凸などを、どの様に評価し応力検討するかについては検討が必要。
劣化予測	腐食モニター(ACM型腐食センサー)	0	腐食による抵抗値の増加を計測し、提案されている腐食速度換算係数により腐食速度を推定する。	被覆の状態、環境によりその値をどの様に評価するかさらに検討必要。

## 2. 2. 3 コンクリート床版の損傷

表-1.8にコンクリート床版の損傷の5段階評価を、表-1.9に各種コンクリート床版に関する点検・調査手法の適用性を示す。

表-1.8では、き裂および腐食と同様に潜伏期から劣化期の損傷レベルに対応する通常の5段階評価と、劣化状態以外を把握する調査手法を識別する目的で評価段階0（劣化予想・原因推定）を設けた。

コンクリート床版は、各損傷段階、劣化要因ごとに種々の調査手法が提案され、また行われている。しかし、どの段階においても適用され、かつある程度の定量的な評価が行える手法としては、やはり目視調査であろうと考えられる。点検者の技量に結果が左右される恐れはあるものの、ひび割れ幅、密度、方向、開口状況、遊離石灰、錆汁の有無、叩き点検を併用することである程度内部状況までも一度に調査することが可能であり、各種の計測機器を使用しシステム化された調査手法と比較しても優るものと考えられる。ただし、調査から評価まで手間暇のかかることは否めない。

ひび割れ調査手法のひとつとして画像処理法は早くから研究されていたが、信頼性（精度）や費用の点で調査手法としてはなかなか採用されにくかったが、近年各種技術の高度化により、精度も向上し、費用的にも改善され、徐々に調査手法のひとつとして使用されはじめている。ひび割れの位置、方向、大きさ、幅などを調査することが出来、床版の健全度の段階評価が理論上可能であり、目視調査にかわる手法として期待される。ただし、現在もっとも精度が高いとされるレーザーによる画像計測システムでも、ひび割れ幅0.5mm程度がシステムとして認識される限度と考えられ、それ以下については経験豊富な技術者が識別しなければならないのが現状であり、より一層の技術の向上が望まれる。

潜在期から劣化期にいたる各段階を評価できる手法として、光ファイバーセンサーによるモニタリングが考えられる。

図-1.1に示すように、床版下面に1本のケーブルを縦横に敷設することにより、床版に生じるひずみや変形を面での計測が可能となる。連続性のある光ファイバーを用いることにより、ひび割れの位置、方向、大きさなどを検知することが可能である。これにより、床版の健全度の5段階評価基準となる1方向、2方向、または亀甲状のひび割れ、更には、路面の陥没に至るまでの評価が可能である。ただし、光ファイバーセンサーをこのような損傷の検知に特化した測定機器の開発は、最近始まったばかりであるため、経済性・信頼性についてはまだ研究の余地が見られる。また、光ファイバーによる情報量は非常に多いことから、情報を効率的に処理できるハード・ソフトの開発も今後さらに望まれる。

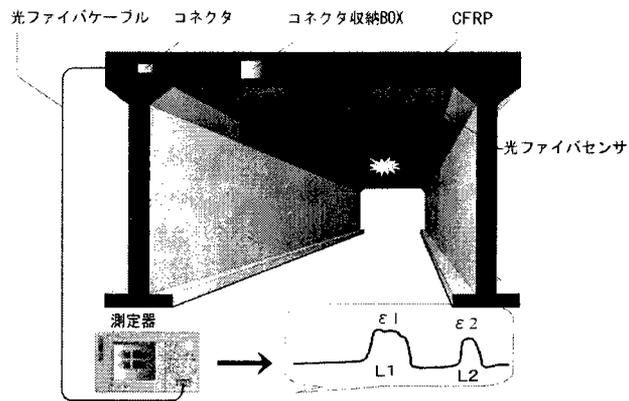


図-1.1 光ファイバセンサーの敷設イメージ

(155 吉永達郎: 光ファイバセンサーのコンクリート構造物の維持管理への応用、コンクリート構造物の診断技術、日本材料学会コンクリート構造物の補修、補強、アップグレードシンポジウム講習会資料、2001.10)

表-1.8 コンクリート床版の損傷の5段階評価

評価段階	劣化過程	定義		状態		備考
		鉄筋	コンクリート面	鉄筋	コンクリート面	
5	潜伏期	塩害または中性化などにより、鉄筋付近の塩化物イオンが腐食限界量まで蓄積またはアルカリ性が腐食限界値まで低下する段階。	ASR（アルカリ骨材反応）は進行しているものの膨張は膨張はまだ現れない、疲労によるひび割れは橋軸直角方向の曲げひび割れ程度。	外観上の変化はほとんど見られない。 中性化深さが鉄筋まで到達、鉄筋近傍の塩化物イオン濃度が腐食限界量以上。	外観上の変化はほとんど見られないが、近接により橋軸直角方向のひび割れが確認される。	
4	進展期	水と酸素の供給下における継続的な腐食の進行段階。	ASRによる膨張が継続的に進行する段階、または疲労により橋軸方向のひび割れも発生し始め格子状のひび割れ網が形成される段階。	腐食は進行しているものの外観上の変化はあまり見られない。	ひび割れは多く見られる段階であるが、鉄筋の錆び汁、ひび割れ幅の開閉、擦り磨き現象等は観察されない。	ひび割れ密度などの外観上の進行は著しいが、床版の連続性は失われておらず、健全度は比較的高い状態。
3	加速期（前期）	腐食ひび割れ発生により水分・酸素の供給により腐食速度が増大する期間。	ASRによる膨張が顕著に現れ、ひび割れ発生以降さらにひび割れが進展する段階。疲労によるひび割れの細密化が進み、曲げ耐力やせん断耐力が急激に低下する段階。	鉄筋の腐食、膨張が進行しそれによるひび割れが顕著に見られる。 疲労によるひび割れの細密化が進行し、ひび割れの幅の開閉、ひび割れ面のこすり合わせ（擦り磨き）現象が見られる。	鉄筋の腐食においてはその断面減少により耐力は急激に低下する。 コンクリート部においても引張側コンクリートの抵抗が期待できず耐力的にかなり低下した状態。	
2	加速期（後期）			鉄筋の腐食による錆び汁が見られ、部分的に剥離・剥落が生じている。 ひび割れのスリット化や角落ちが生じている。		
1	劣化期	鉄筋腐食減量が増大し、部材としての耐力に影響を及ぼす段階。	ひび割れにより床版の連続性が失われ、梁状部材として輪荷重に抵抗するようになる段階。	鉄筋腐食においてはかぶりコンクリートが剥落し、腐食による鉄筋の破断部も観察される。 疲労においてはひび割れが貫通し、漏水による鉄筋の腐食も進行、床版の陥没など恐れもある。		
0	-		劣化予想原因推定	-	-	基本的に加速期以前の状態が対象。

表-1.9 各種コンクリート床版の点検・調査手法の適用性

点検・調査手法	概要	判定可能な評価段階と評価手法		備考	
		評価段階	評価手法		
ひび割れ 剥離等 損傷検出	近接目視 (打音併用)	目視およびテストハンマーの打音により、ひび割れ、遊離石灰、錆び汁、異常たわみ、剥離、内部空洞の有無などの状況を調査する	4~1	ひび割れ状況(ひび割れ密度、方向、幅)、遊離石灰や錆び汁、剥離・剥落などの全体状況により評価する。点検者の技量にもよるが進展期から劣化期の評価は可能。	点検者の能力差により評価バラツキが生じる。正確な劣化予想、原因推定、潜伏期の判定は困難。
	弾性波法	超音波パルスや衝撃波の伝播時間、速度および波形解析により内部欠陥(空洞、空隙)の有無、ひび割れ深さなどを調査する。	5~4	内部欠陥の状況、ひび割れ深さなどの情報を得ることが出来れば、段階5(潜伏期)から段階4(劣化期)の評価が可能。進展期以降は本調査手法を適用することは少ないと考えられる。	使用する波形の種類(超音波、衝撃波など)により、適用できる損傷や精度、深さなどが異なるため注意が必要。また、試験法に関する規格類が制定されておらず、その評価においてもさらに検討が必要。
	赤外線法	表面近傍の温度分布および変化を赤外線映像でとらえ、表面温度の異常から内部欠陥を推定する。	5~4	内部欠陥(浮き、空洞)、漏水などの情報を正確に得ることが出来れば、段階5(潜伏期)から段階4(劣化期)の評価が理論上可能。	気象条件、対象物の表面形状などに測定精度が大きく左右され、本調査のみで評価することは誤差が大きい恐れがあり、適用にはこれらの検討が必要。
	画像処理法	レーザー画像、デジタル画像(VTR、カメラ)などによる調査対象物の画像を処理・解析し、ひび割れの状況(幅、長さ、分布、密度など)を調査する。	5~1	ひび割れ幅と密度、方向などの情報を得ることが出来れば、段階5(潜伏期)から段階1(劣化期)の評価が理論上可能。	画像処理技術に調査結果が大きく左右されるとともに、ひび割れ幅の解析精度が最高でも0.5mm程度なのが実状。
劣化状態 推定	自然電位法	鉄筋が腐食状態に対応した自然電位を示すことを利用し、照合電極と鉄筋との電位差を測定することで、鉄筋の腐食状態を推定する。	5~3	鉄筋の腐食状態を知ることにより、段階5(潜伏期)から段階3(加速期前期)の評価を行うことが可能。段階2(加速期後期)に至っては、鉄筋腐食による錆びがでている状態であり、本調査を行うまでもない。	計測された値により腐食性を判定する指標が国交省(土木研究所)などから示されており、比較的定量的な評価が可能。
	分極抵抗法	コンクリート表面に当てた外部電極から内部鉄筋に微弱な電流を流したときに生じる電流変化量から、腐食速度と反比例の関係にある分極抵抗を求め、内部鉄筋の腐食速度を推定する。	0	推定された鉄筋の腐食速度により今後の劣化度を検討。	劣化予想のために有効な情報を得られる手法であるが、まだ研究段階にある手法が多く、使用装置により試験結果が異なるなどの問題もある。
	反発硬度法	コンクリート表面を専用ハンマーにより打撃し、その反発硬度により圧縮強度を推定する。	0	圧縮強度を推定するだけのため、それにより損傷度を評価することは実質困難。	反発硬度と圧縮強度に理論的關係はなく、推定強度は強度推定式のコンクリート強度に対応したものであり、また試験条件、環境、対象部の材齢など不確定要素が多いため、あくまでも資料の一つとして扱うのが望ましい。
	小径コア法	実構造物から小径コアを抜き取り、圧縮強度試験を行う。	0	静弾性係数の低下程度によりある程度の劣化段階の判定は可能であるが、圧縮強度のみでなく、抜き取ったコアを利用して中性化深さ、塩化物イオン濃度、ASRに関する各種試験なども行えば、かなり精度の高い劣化段階、予想が可能。	実橋からコアを抜き取る必要があり適用は困難な場合が多い。
	中性化深さ測定	フェノールフタレイン1%アルコール溶液により中性化の深さを調べる。	0	中性化深さと鉄筋位置との関係を調べることで、鉄筋腐食に対する劣化予想が可能。	鉄筋位置まで実橋をはつる必要がある。
劣化機構・劣化予測	光ファイバー貼付	連続した光ファイバーを床版下面に配置し、ひずみをモニターする。	5~0	連続性のある光ファイバーを用いることにより、ひび割れの位置、方向、大きさなどを検知することが可能であり、これにより床版の健全度の5段階評価基準となる1方向、2方向、または亀甲状のひび割れ、更には、路面の陥没に至るまでの評価が可能である。	モニターすることで各段階の評価が可能であり、モニターの設備、システムが必要。光ファイバーセンサーをこのような損傷の検知に特化した測定機器の開発は、最近始まったばかりであるため、経済性・信頼性についてはさらに検討が必要。
	載荷試験	既知の重量の車両を橋梁上に載荷し、その時のひずみ、たわみなどを計測し、設計値などと比較する。	5~0	計測値の解析により疲労などに関する劣化予想が可能であるとともに、たわみ量を計算値と比較することで劣化程度を評価することも可能。	計量車を静的に載荷するには1車線規制などの交通規制が必要となる。
	塩化物イオン濃度調査	電気化学的手法(電位差滴定法など)や重量法(塩化銀沈殿法)などにより、コンクリート中の塩化物イオン含有量を調査する。	5, 0	限界塩化物イオン濃度に達している表面からの深さおよびかぶりに対する深さから、拡散係数を用いた推定式により、腐食が開始される時期または腐食が開始された時期を予測することが可能。	
	ASR反応性骨材調査	走査電子顕微鏡観察、蛍光X線分析法、化学成分分析などによりアルカリ骨材反応による劣化が、またはその恐れがあるかなどを調査する。	5, 0	現時点においては、定量的な劣化進行を予測できるまでには至っていないが、潜在的な劣化進行の可能性について定性的ではあるが評価することが可能。	使用されている骨材が反応性であれば、現時点で膨張劣化が確認されていなくとも、長期の使用後には膨張する可能性があり、その時点で段階1(潜伏期)と評価される。

## 2.3 モニタリング

### 2.3.1 概要

既設橋に限らず、一般の構造物に対する点検・調査として“モニタリング”という手法がある。構造物の維持管理の重要性が近年クローズアップされるようになり、その維持管理に関する研究が盛んになってきている。維持管理を行っていく上で、その構造物の状態を把握するため、点検・調査は不可欠なもので、この点検・調査について安価で正確に、かつ、簡単に行える“モニタリング”、特に“遠隔モニタリング”についての技術に期待するのは、誰もが考えることである。「2.1」、「2.2」でも“モニタリング”を部分的には紹介しているが、ここであらためて“モニタリング”について整理する。

### 2.3.2 定義

一般に、“モニタリング”という用語は定着しているが、定義としては曖昧である。各種構造物、各部材、部位、または、その用途に応じてそれぞれにて“モニタリング”またはその前後に文字を追加した用語を使用しているのが現状で、それぞれがイメージしている“モニタリング”は必ずしも一致しているものではない。また、“モニタリング”に類似した用語として“計測”、“センシング”などもあり、“モニタリング”の定義を明確にしているものは少ない。そうした中でも“モニタリング”の定義について、文献等に記載されているものを収集し、以下に列挙する。

- ◆ 『構造物の挙動を監視・評価すること』  
(『土木学会 メンテナンス工学連合小委員会 報告書』  
平成 15 年 6 月)
- ◆ 『一般に長期・連続的な監視（例えば、長大橋の動態観測や車両重量計測等）』  
(『土木技術資料』 2003 年 8 月)
- ◆ 『補修・補強の必要性を判断するために亀裂の進展性の監視』  
『亀裂の発見から補修・補強までに期間を要する場合には、その安全性を監視』  
(『鋼橋における劣化現象と損傷の評価』 土木学会)
- ◆ 『橋梁振動モニタリングとは、単に橋梁の振動を計測するのみでなく、その計測結果を基に、構造物の設計、施工、維持管理に関する有用な知見を得ることを目指すものである。』  
(『橋梁振動モニタリングのガイドライン』 土木学会)
- ◆ 『モニタリングとは、常に橋梁部材の応力などを時系列のデータとして観測し、得られたデータの変化から対策工事の立案、工事前後の評価などや将来予測を期待する手法がモニタリング技術と言える。』  
(『モニタリング技術、橋梁振動コロキウム '97 論文集』)

以上のように、現状では“モニタリング”の定義について十分に整理されていないと言える。技術の進歩により定義について変わっていくことも考えられるが、ここでWG活動テーマをふまえ、あえて、土木・橋梁分野において“モニタリング”の定義付けを行った。

『橋梁の部位・部材に対して、継続的に計測器等によってデータ（情報）を収集し、構造物の実態を把握・評価した上で、その結果を今後の対策に反映していく技術』

その現場に人がいるかいないか、計測器の使用の有無、データ収集が自動かどうか、判断が自動かどうかなどについては広義か狭義かの問題であり、ここではあえて示していない。結果から対策に反映できているかどうかポイントとなる。

### 2.3.3 適用性

#### (1) 橋梁のライフサイクル

橋梁のライフサイクルに応じて、“モニタリング”の目的が異なってくる。どの場面でどのような目的で“モニタリング”を行うかが、不明確な場合、有効なモニタリング技術とされないと考えられる。本来、橋梁は図-1.2に示すように“計画設計”から“撤去”までのライフサイクルがある。その橋梁のライフサイクルにあわせた目的を明確にすれば計測方法も評価も明確になり有効な“モニタリング”が実現できると考えられる。今回は、図-2.2に示すすべての橋梁のライフサイクルについて扱うのではなく、既設橋の事態把握がテーマであるので、“供用中”、“維持管理”、“補修・補強”が適用の対象範囲となる。

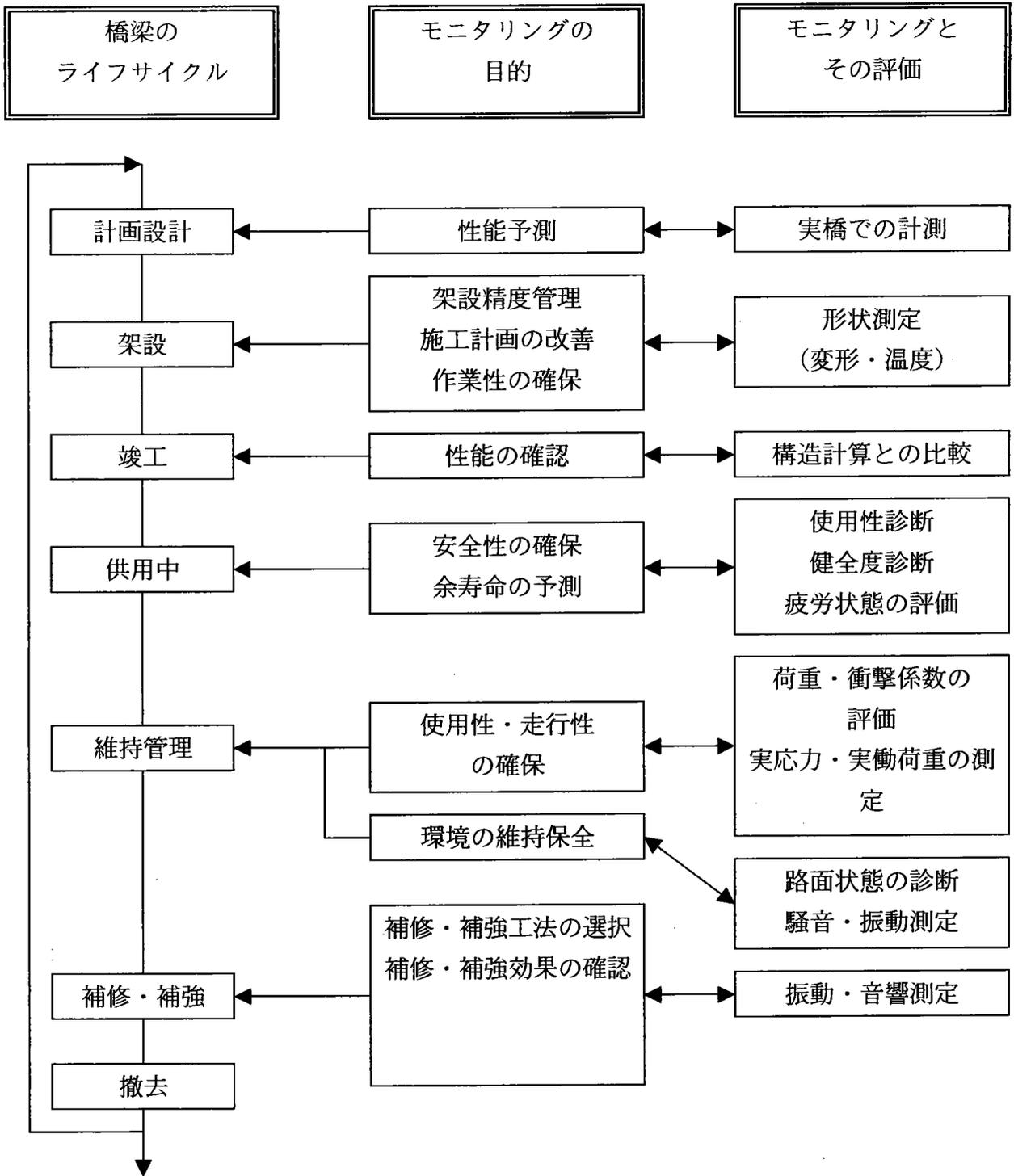


図-1. 2 橋梁のライフサイクルによるモニタリングの全体像<sup>1)</sup>

## (2) 維持管理支援

橋梁のライフサイクルによるモニタリングの全体像を図-1. 2に示しているが、一般に、モニタリング技術の適用性は、長大橋の動態観測などで活用されているものを指すことが多い。しかしながら、大半の橋梁数を占める中小規模の既設橋梁を対象とした場合、ライフサイクル全体を示すよりも、現行の維持管理業務を支援する観点から整理する方がわかりやすい。維持管理支援としてのモニタリング技術の適用性について、以下の適用場面に分類し、整理した。

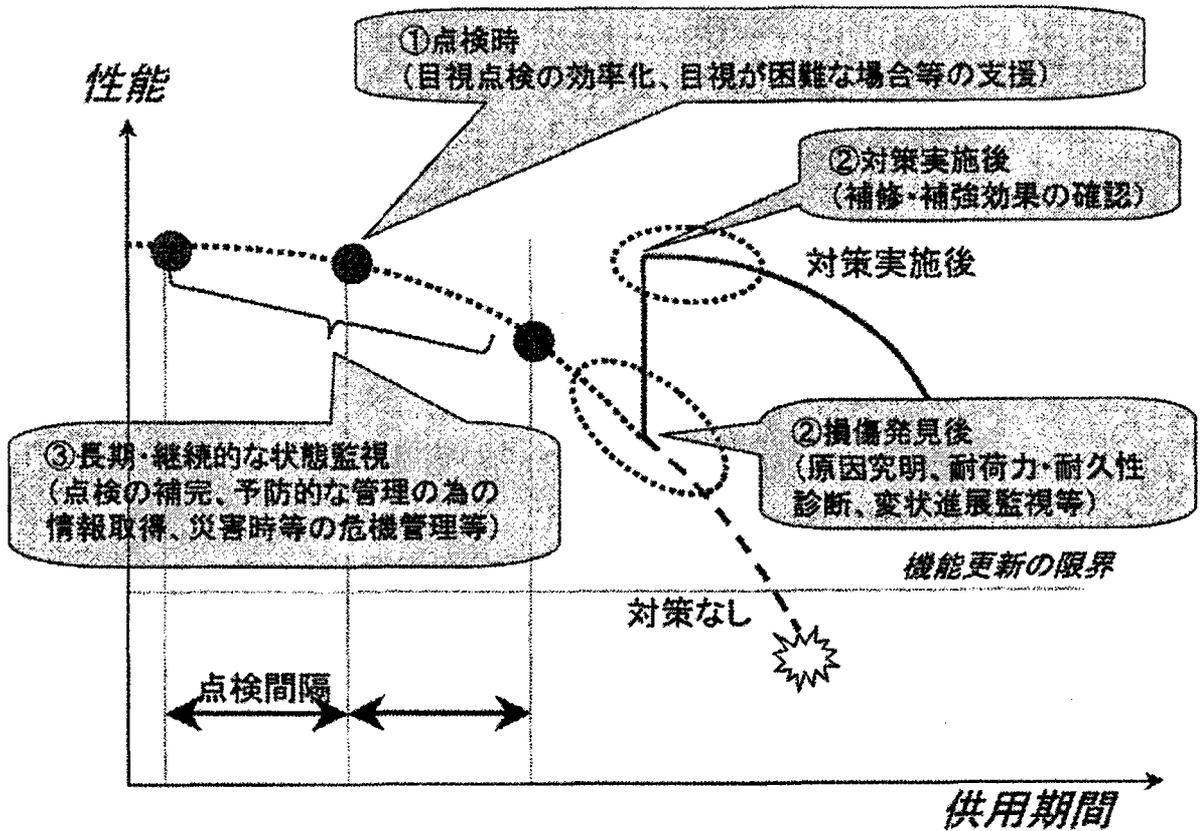


図-1.3 モニタリング技術による維持管理支援のイメージ<sup>2)</sup>

### ① 点検時における目視点検等の支援

目視主体の点検時において

- a、客観的・定量的なデータを必要とする場合
  - b、目視では把握できない部材内部や点検しにくい部位の状態を把握する必要がある場合
- 必要な条件として、以下の項目がある。
- 多数の橋梁に対し適用可能な技術であること
  - 低コスト、点検の効率化が図れることが可能な技術であること

### ② 損傷発見後、対策実施後の調査支援

- a、耐荷力の診断が必要な場合
- b、損傷に対する原因究明、対策検討のための応力状態を把握する必要がある場合
- c、応急対策を講じた後、恒久対策実施までの安全性監視を行う場合
- d、対策効果の確認を行う場合

### ③ 橋梁の状態の長期・連続的な監視

橋梁状態を連続的に監視し、目視点検の補間、安全性の向上を目的とする場合

一つの位置付けとして、予防的な維持管理への活用がある。

- 特定の橋梁を対象に、それらを当該道路・地域の活荷重や腐食環境等の供用状態を長期モニタリングするセンサー
- 地震時の被災情報検知のセンサー

費用対効果、センサーの長期耐久・信頼性等の技術的課題である。

橋梁のライフサイクル、または、維持管理支援の観点では、“モニタリング”は以上のような適用性になるが、もう少し具体的なものとしては、以下の項目を把握するために道路管理者が橋梁の“モニタリング”を行うことになる。

- 橋梁に作用する外力
- 橋梁に発生する現象
- 対象部材の健全度、劣化予測
- 異常時の変状
- 橋梁の安全性

鋼橋に限定すれば、“モニタリング”が有効と思われる項目、目的は以下のように整理できる。

表-1. 10 鋼橋におけるモニタリングの目的

	目的	計測項目	計測方法	評価対象
常時	外力の把握	車両重量	車両重量計測	活荷重の実態
	現象の把握	ひずみ	光ファイバーセンサー	主要部材の応力変動 累積疲労損傷度
		床版ひび割れ	デジタルカメラ	床版の劣化状態
		部材の温度	物体温度計	主桁のひずみと温度の相関
		路面の凍結	物体温度計	鋼床版の温度
		桁の振動	加速度計	桁の異常振動
		支承の変位	変位計	主桁の移動量
異常時	外力の把握	地震動（地表面）	地震計	震度
		台風	風速計	風速
	現象の把握	支承の変位	ひずみセンサ	桁の変形
		段差	ITV カメラ	桁の変形
		遊間の異常	光ファイバーセンサー	桁、下部構造の変形
		傾斜	傾斜計	下部構造の傾斜

## 2.3.4 実橋で実施された実用例

実橋で実施された実用例について一覧表としてまとめ、そのあとにそれぞれ、1例ごとにまとめたものを添付する。

表-1. 11 モニタリングの実用例

	文献名	概要	著者	雑誌名	発行日
1	国土交通省近畿地方整備局管内を対象とした橋梁モニタリングシステムに関する研究	<ul style="list-style-type: none"> <li>橋梁の延命化を図るための維持管理の方法として、光ファイバーを使用した遠隔計測により、橋梁の状態をリアルタイムに監視するシステムを構築した。</li> <li>モニタリング項目：自動車荷重、応力計測、支点反力、支承移動量、床版疲労劣化追跡</li> </ul>	井藤詳三他	土木学会第18回年次講習会	平成15年9月
2	光通信網を使用した鋼橋梁の健全度評価モニタリングシステムの開発	<ul style="list-style-type: none"> <li>鋼橋の安全性や機能を確保するため、メンテナンスにおいて大量の測定データを瞬時に集め、専門家が判断できるように、光通信網を使用したモニタリングシステムを構築した。</li> <li>モニタリング項目：自動車荷重、ひずみ、温度変化</li> </ul>	三木千壽他	土木学会論文集	2001年9月
3	鋼桁橋を用いたBWINによる自動車荷重のモニタリング	<ul style="list-style-type: none"> <li>橋梁の維持管理の合理化を図るためには、道路上を走る荷重の把握が必要である。そこで、橋梁を「はかり」として用いて、自動車荷重の実体を把握し、橋梁の影響を分析するための資料とした。</li> <li>モニタリング項目：自動車荷重</li> </ul>	小塩達也他	橋梁振動コロキウム01論文集	
4	光ファイバーセンサーによるレンガ造り高架橋の長期連続モニタリング	<ul style="list-style-type: none"> <li>明治43年建造の、レンガ造りの連続アーチ橋である。維持管理の一環として、光ファイバーセンサーを用いて、構造モニタリングを行っている。</li> <li>モニタリング項目：変形</li> </ul>	友利方彦他	土木学会第57回年次学術講演会	平成14年9月
5	鋼構造物の診断技術	<ul style="list-style-type: none"> <li>膨大な道路橋の点検・調査の維持管理業務の効率化、構造物の状態評価・診断における定量化・客観性の向上の観点から、これを支援するための道路橋の点検・診断技術の概要性をまとめ、更に各種センサーを用いて、鋼部材の劣化・損傷度を把握するためのモニタリング技術の活用方法を提案した。</li> <li>モニタリング項目：主桁の応力度、可動支承の水平変位</li> </ul>	村越潤他	独立法人土木研究所	平成12年4月
6	高架橋上の付属構造物の振動測定装置	<ul style="list-style-type: none"> <li>高速道路上では、測定器の設置が困難で、電源の利用ができないことから、高架の高速道路における付属構造物の健全度を把握するためのモニタリングの一つとして、測定器を開発した。</li> <li>モニタリング項目：ひずみ</li> </ul>	高野晴夫他	橋梁と基礎	2003年1月
7	移動体通信による環境振動・騒音・映像を統合化した遠隔モニタリングシステムの開発	<ul style="list-style-type: none"> <li>道路付近の住宅・住民に環境振動・騒音の影響を与えないため、環境振動・騒音を計測し、また道路の状況を把握するための映像モニタリングを合わせたシステムを構築した。</li> <li>モニタリング項目：環境振動、騒音、映像</li> </ul>	木場俊郎他	土木学会第58回年次学術講演会	平成15年4月
8	高精度振動数自動推定システムの開発と遠隔計測への適用	<ul style="list-style-type: none"> <li>構造物に損傷が発生すると、剛性が低下し、固有振動数が低下することから、この振動数の変化をモニタリングし、構造物の損傷を逆探知するシステムを開発した。</li> <li>モニタリング項目：構造物の常時微動</li> </ul>	増田大樹他	土木学会第59回年次学術講演会	平成16年9月

分類	文献名	国土交通省近畿地方整備局管内を対象とした橋梁モニタリングシステムに関する研究			
著者	井藤詳三他	雑誌名	土木学会第18回年次講習会	発行年月	平成15年9月

**目的**

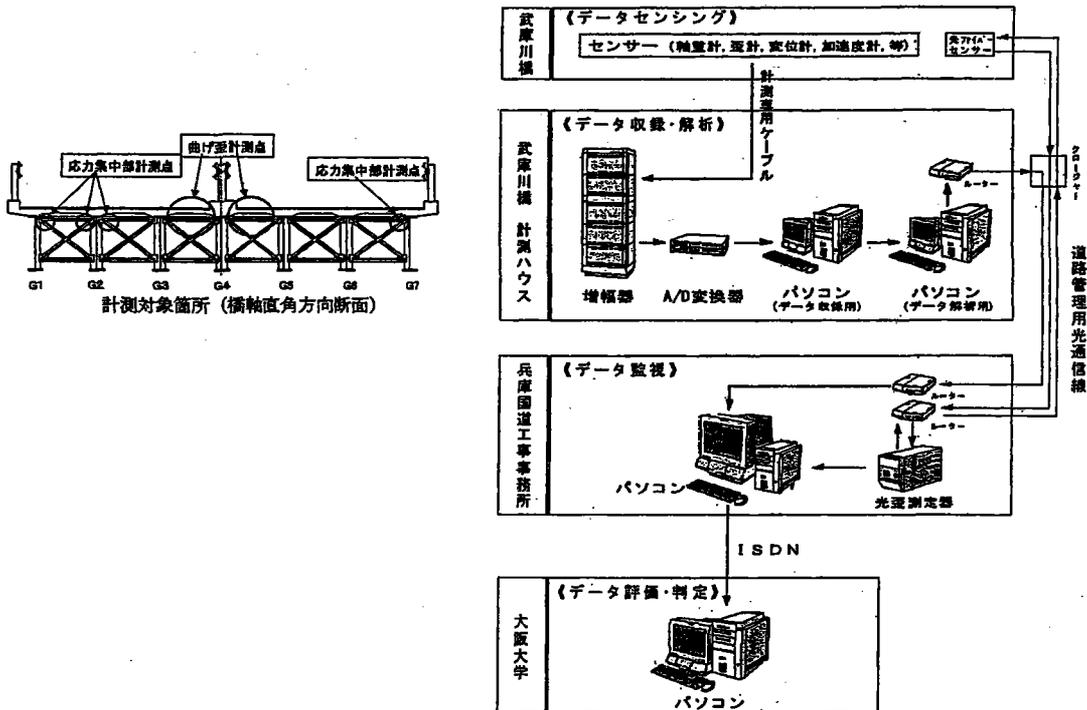
- ・主要国道や重交通区間で老朽化した橋梁の架け替えは、少子高齢化社会や財政の面から困難である。そのため、適切な維持管理を行い橋梁の延命化を図る必要がある。
- ・その維持管理の方法として、光ファイバーを使用した遠隔計測により、橋梁の状態をリアルタイムに監視するシステムの構築を行った。

**モニタリング項目**

- ・自動車荷重
- ・応力計測
- ・支点反力
- ・支承移動量
- ・床版疲労劣化追跡

**概要**

- ・橋梁の劣化要因から、測定項目と着目部材を選定した。
- ・人為的環境要因（自動車荷重）については、床版、主桁・床組、支承に着目し、疲労損傷の判定、疲労破壊寿命推定を行えるようにした。
- ・自然環境要因（地震）については、上部工の異常な移動量や支承反力の変動で捉えることにした。
- ・軸重測定、応力集中部から得られたデータは常時監視として蓄積し、床版、鋼桁の余寿命をモニターに表示する。
- ・地震等の異常監視においては、構造異常が生じた際に異常値がモニターされ、警告される。
- ・今後、データを蓄積し、軸重頻度分布の作成と疲労寿命推定の精度を高める。



モニタリングシステム全体構成

分類		文献名	光通信網を使用した鋼橋梁の健全度評価モニタリングシステムの開発		
著者	三木千壽他	雑誌名	土木学会論文集	発行年月	2001年9月

目的

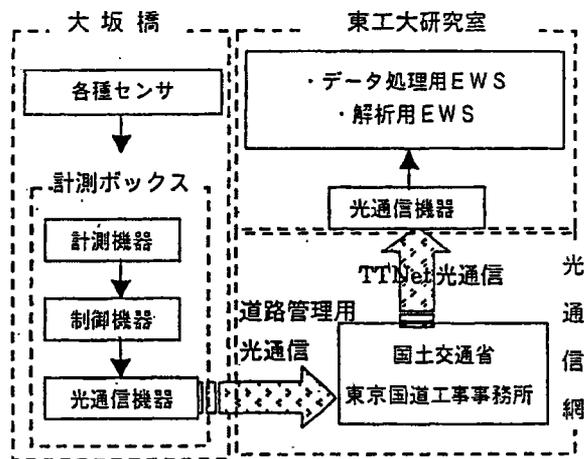
- ・年数を経た鋼橋の、安全性や機能の確保は、重大な課題である。そのためには、橋梁のメンテナンスにおいて、モニタリングでの大量の測定データを瞬時に集め、専門家が判断するシステムが有効である。
- ・そこで、光通信網を使用したモニタリングシステムの構築を図った。

モニタリング項目

- ・自動車荷重
- ・ひずみ
- ・温度変化

概要

- ・動態観測により大型重量車の通行特性、大型重量車による主桁の疲労損傷度を確認できた。
- ・ピーク記憶型ひずみセンサにより、計測中に地震時等の大きな外力が作用しなかったことが確認できた。
- ・ひずみゲージや物体温度計により、温度上昇時、主桁に圧縮力を受けていることを確認できた。
- ・システムは5年間のメンテナンスフリーを目標としたが、このシステムのメンテナンスは今後の課題である。



モニタリングシステムの概要

分類		文献名	鋼I桁橋を用いたBWINによる自動車荷重によるモニタリング	
著者	小塩達也他	雑誌名	橋梁振動工研M01論文集	発行年月

目的

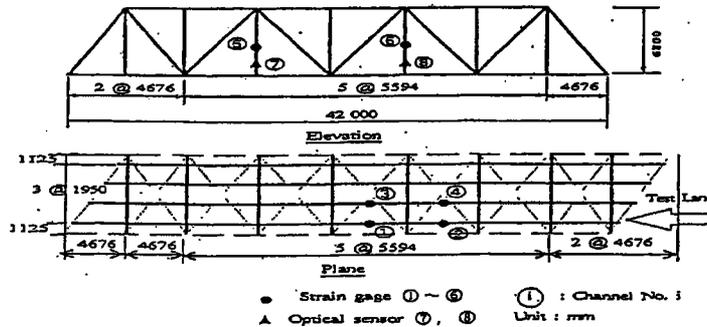
- ・道路管理者が予想する、定格内での自動車の運転による損傷と、それ以上の過負荷による損傷は、互いに異なる性格のものである。
- ・橋梁の維持管理の合理化を図るには、道路上を走る荷重を把握し、どのような影響をもたらすか、分析が必要である。
- ・そこで、橋梁を「はかり」として使い、自動車荷重の実体を把握し、橋梁への影響を分析するための資料とした。

モニタリング項目

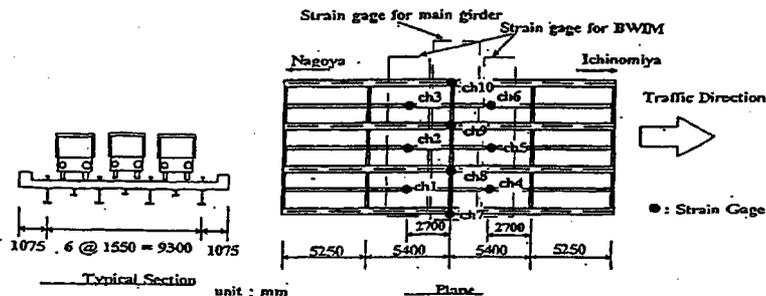
- ・自動車荷重

概要

- ・床版補強用増設縦桁を大型車両の「はかり」として、大型車両の車両総重量、通過速度、最遠軸距を求める手法を構築した。
- ・床版補強用縦桁は、重量検出部材としては充分有効である。荷重推定精度は、10%程度である。



ワーレントラス橋のひずみゲージ貼付位置



枇杷島高架橋の測定径間の概要

分類		文献名	光ファイバーセンサーによるレンガ造り高架橋の長期連続モニタリング		
著者	友利方彦他	雑誌名	土木学会第57回年次学術講演会	発行年月	平成14年9月

目的

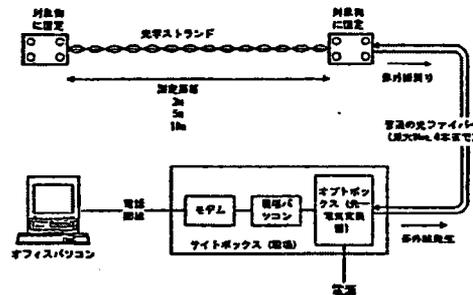
- ・本橋は、現在供用されている、明治43年建造の、レンガ造り連続アーチ鉄道橋である。
- ・維持管理の一環として、光ファイバーセンサーを用いた構造モニタリングを行っている。

モニタリング項目

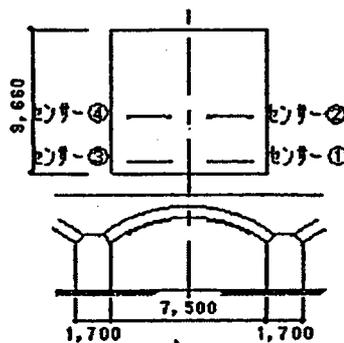
- ・変形

概要

- ・本橋は、レンガ造りのアーチ橋であり、基礎は国産の松杭を使用している。
- ・アーチの付け根と、アーチの1/4点に応力が集中することから、検査重点箇所とした。
- ・高架橋で目視検査ができない場合は、光ファイバーセンサーは、有効である。



モニタリングシステム構成



高架橋の形状及びセンサー設置位置

分類		文献名	鋼構造物の診断技術		
著者	村越潤他	雑誌名	独立法人土木研究所	発行年月	平成12年4月

目的

- ・膨大な道路橋の点検・調査の維持管理業務の効率化、構造物の状態評価・診断における定量化・客観性の向上の観点から、これらを支援する点検・診断技術が求められている。
- ・そこで、道路橋における点検・診断技術の概要性についてまとめ、更に各種センサーを用いて鋼部材の劣化・損傷度の状態を把握するためのモニタリング技術の活用方法を提案する。

モニタリング項目

- ・主桁の応力度
- ・可動支承の水平変位

概要

- ・モニタリング技術の、維持管理における概要対象について整理した。
- ・主桁の伸びは、概ね計算値と同程度である。
- ・疲労損傷度の変動を把握した。
- ・試験橋及び実橋で計測した長期計測データを取りまとめ、適宜公表する。

表-1 モニタリングの適用対象と計測方法

計測方法 適用対象	継続的	不連続的・一時的 (時系列に計測)
事前対応 (変状発生前)	<ul style="list-style-type: none"> <li>・地震時等の変状監視</li> <li>・モニタリング橋等</li> </ul>	<ul style="list-style-type: none"> <li>・目視点検の補間、点検の効率化</li> <li>・部材内部の状況把握</li> </ul>
事後対応 (損傷発見後、 対策実施後)	<ul style="list-style-type: none"> <li>・損傷に対する原因究明、対策検討が必要な場合</li> <li>・耐荷力、耐久性の診断が必要な場合</li> <li>・対策後の変状の進展性の監視</li> <li>・補修補強対策後の効果確認等</li> </ul>	

表-2 調査対象とした主な点検・診断技術

点検・診断技術		計測内容	
非破壊検査	目視撮影	デジタルカメラによる撮影 構造物の損傷状態(鋼材の亀裂等)	
		ビデオカメラ 構造物の状態(遠望目視)	
	弾性波法	振動法、打音法 加速度、構造物の振動特性	
		超音波法 溶接内部欠陥、亀裂等	
		AE法 亀裂の発生進展等	
	電磁波法	放射線法 溶接内部欠陥、亀裂等	
		レーザードップラー 変位等	
	電気化学的方法	赤外線サーモグラフィ 欠陥箇所の特等(温度差の測定)	
	物理的方法 (ひずみ・変位計測)	腐食センサー 腐材の腐食速度	
		光ファイバー	FBG ひずみ(点的な測定)
			BOTDR, OTDR, SOFO, OSMOS ひずみ(線的、面的な測定)
		ひずみゲージ	ひずみ
		磁歪法	ひずみ
ピーク認識型ひずみセンサー (SMSゲージ)		最大変位と最大ひずみ	
レーザレベル変位計		変位(非接触型)	
インダクタンス式変位計		変位(接触型)	
疲労センサー(犠牲試験片)	累積疲労損傷度		
傾角センサー	異常変位等		

分類		文献名	高架橋上の付属構造物の振動測定装置		
著者	高野晴夫他	雑誌名	橋梁と基礎	発行年月	2003年1月

目的

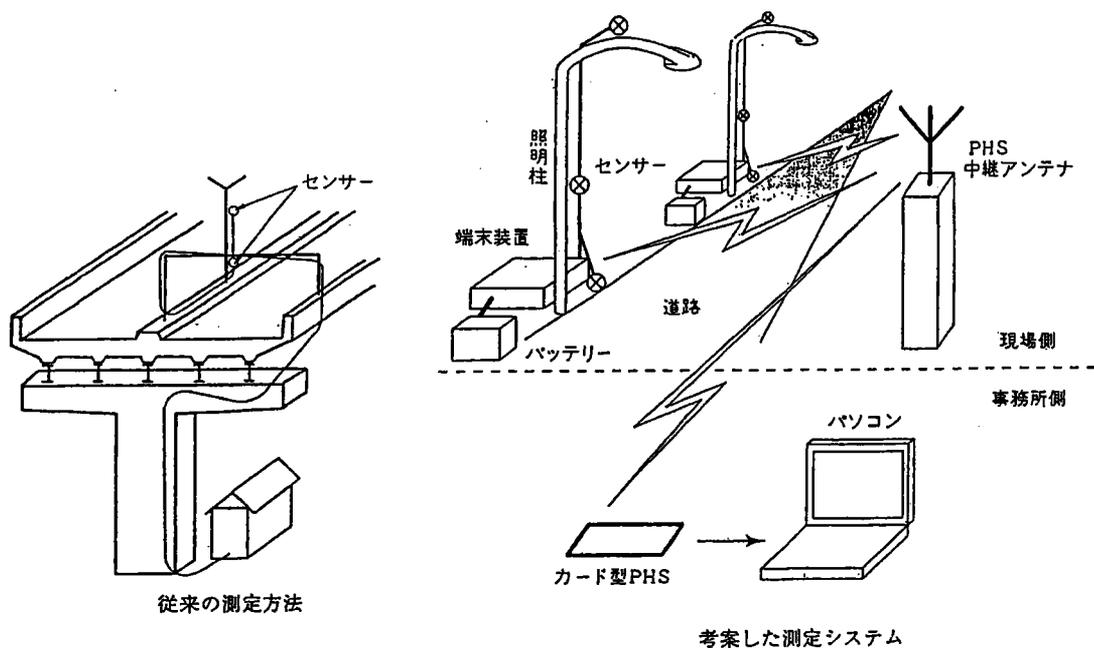
- ・高架の高速道路上では、計測器の設置が困難で、電源の利用ができない。
- ・そこで、高架の高速道路における付属構造物の健全度を把握するモニタリングの一つとして、側定器を開発した。

モニタリング項目

- ・ひずみ

概要

- ・ひずみデータから、付属物の疲労強度を推定した。
- ・波形データから、付属物や橋体の固有振動数を計測した。
- ・今後、本装置は、橋梁本体の疲労強度、伸縮継手の移動量、免震装置の変形量等の測定運用に検討する。



分類		文献名	移動体通信による環境振動・騒音・映像を統合化した遠隔モニタリングシステムの開発		
著者	木場俊郎他	雑誌名	土木学会第58回年次学術講演会	発行年月	平成15年9月

目的

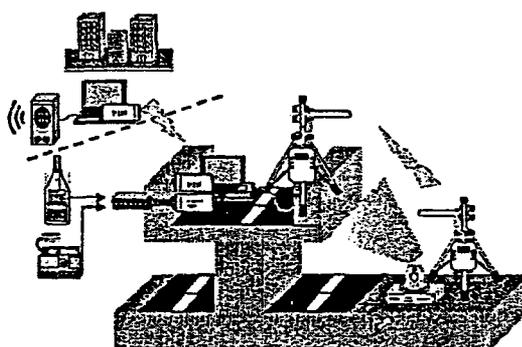
- ・ 走行車両・積載荷重の増加により、道路橋周辺には環境振動・騒音が発生し、付近の住宅・住民に影響を与える可能性がある。
- ・ そこで、道路橋周辺の環境振動・騒音を計測する必要があり、また、道路橋の状況を把握するための映像モニタリングも必要と考え、システムを構築し、実橋で確認した。

モニタリング項目

- ・ 環境振動
- ・ 騒音
- ・ 映像

概要

- ・ 振動・騒音の計測データを自動的にパソコンの取り込み、ネットワーク技術を用いて遠隔地でモニタリングするシステムを構築した。
- ・ 本システムを実橋に摘要し、システムの有効性を確認した。



遠隔モニタリングシステムの概要

分類		文献名	高精度振動数自動推定システムの開発と遠隔計測への適用		
著者	増田大樹他	雑誌名	土木学会第59回年次学術講演会	発行年月	平成16年9月

#### 目的

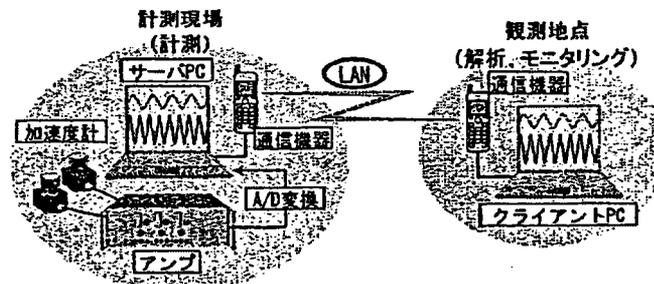
- ・ 構造物に損傷が発生すると、剛性の低下に伴い、構造物の固有振動数は低下する。この振動数の変化をモニタリングすることで、構造物の損傷を逆探知することができる。そのためには、微少な振動数変化を検出できる高精度なモニタリングシステムが必要となる。
- ・ そこで、高精度振動数自動推定システムを開発し、実橋で確認した。

#### モニタリング項目

- ・ 構造物の常時微動

#### 概要

- ・ 構造物の常時微動から固有振動数を高精度に自動推定するモニタリングシステムを開発し、遠隔計測への概要を図った。
- ・ 本システムを実橋に概要し、システムの有効性を確認した。



モニタリングシステムの概要

## 2. 3. 5 課題

構造物の維持管理を行っていく上で、その構造物の状態を把握するための点検・調査は不可欠なものである。十分な点検・調査が行われているかどうかは別にして、点検・調査を効率よく行いたいと考えるのは当然の発想である。そのため、安全で正確にかつ簡単に行えるモニタリング技術の確立は、期待が大きいですが、橋梁分野における事例はまだ少なく発展途上にあると思われる。

他分野に比べてモニタリング技術の進展が鈍く、事例が増えない要因として、

- ① 目的が明確ではない
- ② 蓄積されたデータが有効に活用されていない
- ③ コストが高い

などが挙げられる。

ここでは、この橋梁分野における“モニタリング”の現状の解決しなければならない課題について整理を行った。

### (1) 目的の明確化

目的を明確にして“モニタリング”を行っているかどうか大きな問題である。今回調べた文献等の中にもどのような変状を、どの段階で、どのような精度で確認し、どのような対策につなげることができるかが明確ではなく、目的に見合った結果を得ることができたかどうか曖昧なものが見受けられた。

変状の評価は“モニタリング”に限った問題ではないが、“モニタリング”を実施するにあたっては、次の項目が重要であると考ええる。

- 何のために行うか
- 何をどのように測るか
- どの程度の期間測るか
- 何を判断し結果として何を得るのか

目的が最も明確な“モニタリング”例としては、災害時・事故発生時などの構造物の監視が挙げられる。災害監視という点では目的は明確であり、目的が明確であればおのずと、どこをどの様に計測しその結果で何を判断しなければならないかなども明確となる。しかし、一般的な橋梁の変状は数年、数十年単位で進行するため、リアルタイムでの“モニタリング”の必要性は少なく、またそれが有効とは限らない場合も考えられる。計測機器や通信技術の進歩により大容量のデータを比較的容易に計測しデータを収集することが出来るようになってきた。そのため、単に数値を取ることが目的となってしまう、“モニタリング”により何を明らかとし何をどうやって判断するのかといった真の目的が曖昧なままのケースも多いのではないかとと思われる。その様なケースでは“モニタリング”により得られた貴重なデータが有効に活用されるすべがなく、“モニタリング”への不信感のみが募る恐れも危惧される。

多くの目的を一度に満たすことができなくても、ある特定の目的を明確にすれば、単なる計測データの数値収集ではなく、実用的な“モニタリング”として実現できるものも多くあるのではないだろうか。

## (2) データの有効活用

“モニタリング”によっては、膨大かつ貴重なデータを蓄積しているものもあると推測される。それらのデータが十分に解析され有効に活用されているのか、また、一般に公開されているものなのか分からない場合が多い。

今後、蓄積されたデータを解析する技術とデータに基づいた的確な健全度評価と補修技術や的確な維持管理手法の開発が確立されれば、データの有効な活用も期待でき、その適用範囲は拡大するものと思われる。先に述べた“目的の明確化”を実行できれば、自然に解決される問題ではないだろうか。

## (3) 経済性（コストの低減）

文献調査では“モニタリング”を行うに際して、どの程度の費用を要したのか詳細に調べるのが困難であり、実際に経済性までうまく表記されているものも少なく、まとめることができなかった。一般には“モニタリング”はシステムも含めるとかなり高価なものであるとの認識がある。このため、廉価なモニタリングシステムの開発が急務であり、これが普及を早めるための最も近道であると思われる。

これらの他にも技術的な問題として以下のような項目も挙げられる。

- 変状の発生位置を事前に特定し、センサーを取り付けることができるか
- 変状の待ち受け時間とセンサーおよびモニタリングシステムの寿命はマッチしているか（実際に変状が生じるかもしれない数十年後、観測機器は陳腐化せず健在か）

計測機器やデータ伝送などの技術が日々進歩し、“モニタリング”を行えば全てのことが明らかになるような思い込みや大きな期待感があるが、橋梁分野における“モニタリング”は、その利用方法や可能性も含めてまだまだ発展途上の技術と考えられる。目的を明確にして、データを公開することを繰り返し、問題点をひとつひとつ解決していけば、実用的な“モニタリング”は近い将来、きっと実現するであろう。

## 参考文献

- 1) 橋梁振動モニタリングのガイドライン, 土木学会, 2000.10
- 2) 部材応力のモニタリングによる鋼橋の状態監視に関する基礎検討, 土木技術資料, 2003.8

### 3. 今後の展望

#### 3.1 新技術

既設橋の実態把握には、維持管理の最初に実施する点検・調査が重要な工程であり、第2章では鋼橋の代表的な損傷である疲労き裂、腐食、コンクリート床版の損傷に対する現状の各種手法、適用性について述べた。また点検・調査技術において、今後発展が期待されるモニタリングの現状と課題についても言及した。ここでは点検・調査技術の、特にモニタリング技術の将来展望として、今後開発が期待される技術、および他分野で既に実用化され、橋梁の点検・調査に適用が見込める技術について、いくつかの技術を紹介するものとする。

##### (1) 光ファイバーセンサー

構造物の動きを常時モニタリングするセンサーとして光ファイバーセンサーが注目されている。光ファイバーは従来高速デジタル通信用に開発されたものであるが、ファイバーケーブル内の散乱光（ブリルアン散乱、レーリー散乱、ラマン散乱）の検出によりケーブルに加わったひずみや屈曲、温度を検知するセンサーとしての機能も併せ持っている。従来のひずみセンサーとの大きな違いは、連続した区間の計測が可能である。鋼橋やコンクリート構造物のひずみセンサーとしてだけでなく、パイプラインやプラント施設、アスファルト舗装の温度や変状の監視管理、またトンネル内の火災検知センサーとして試験運用されている。鋼橋に試験的に適用されている光ファイバーセンサーをまとめると表1.12のようになる。

表-1.12 光ファイバーセンサーのまとめ

比較項目	BOTDR	光学ストランド	FBG	ひずみゲージ (参考)
検出ひずみ	引張/圧縮 (予備伸張あり)	引張	引張/圧縮	引張/圧縮
測定精度	±0.01%	±0.002~0.02%	±0.004%	±0.001%
分解能	±0.5m	2~10m (センサ長)	数mm~数cm (センサ長)	数mm~数cm (センサ長)
センサの連続性	連続	離散	離散	離散
センサまでの最大距離	約10km	8~10km	約10km	数10m
計測時間	数分間	リアルタイム	リアルタイム	リアルタイム
センサ材料	通信用光ファイバ (ファイバの加工なし)	通信用光ファイバ (ファイバの加工あり)	通信用光ファイバ (ファイバの加工あり)	抵抗線 (金属箔)
検出する物理量	散乱光の 周波数シフト	ファイバの曲げによる 光の損失変化	反射光の 周波数シフト	電気抵抗の変化
特長	・光ファイバに沿った 全体的な情報を一度に 計測可能。 ・電磁ノイズの影響を 受けにくい。 ・センサ1箇所当たり3 ~4万円程度(施工費別)	・高精度。 ・動的計測可能。 ・電磁ノイズの影響を 受けにくい。	・高精度。 ・動的計測可能。 ・電磁ノイズの影響を 受けにくい。	・高精度。 ・動的計測可能。 ・センサが安価 (1枚数百~数千 円程度)
問題点	・測定精度があまり高 くない。 ・センサ部分の設置に 手間がかかる。 ・測定器の価格が高い (約2000万円) ・温度補正が必要。	・計測レンジが狭い。 (0.5%まで) ・センサ1個に1本の 光ファイバが必要。 ・温度補正が必要。	・1本の光ファイバに 設置可能なグレーティ ングの数に制限があ る。(10個程度) ・温度補正が必要。 ・センサ1個当たり20 万円程度(施工費別)	・電磁ノイズの影響 を受けやすい。 ・温度補正が必要。

以下では、代表的なセンサーを紹介する。

プリテンションをかけた計測用光ファイバーとテンションをかけない参照用光ファイバーの2本をセンサー部に内蔵し、光の反射時間の時間差から、構造物の変位を測定するセンサーが図-1.4 (SOFO) である。計測原理がシンプルで高精度であり、長期安定性に優れている。ゲージ長は 0.25~50m で分解能は 2 $\mu$ m、各種構造物の変位計測、変状計測への適用が可能である。

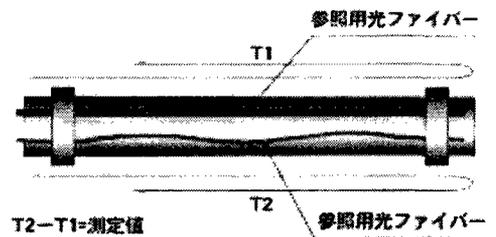


図-1.4 SOFO 測定原理概念図

3本の光ファイバーをより線の光学ストランドとし、光ファイバーの中を通る光が経路の曲がり部で外部に漏れ、ファイバー内部を通過する光の強度減少により構造物の変形やひずみを感知するセンサーが図-1.5(OSMOS) である。

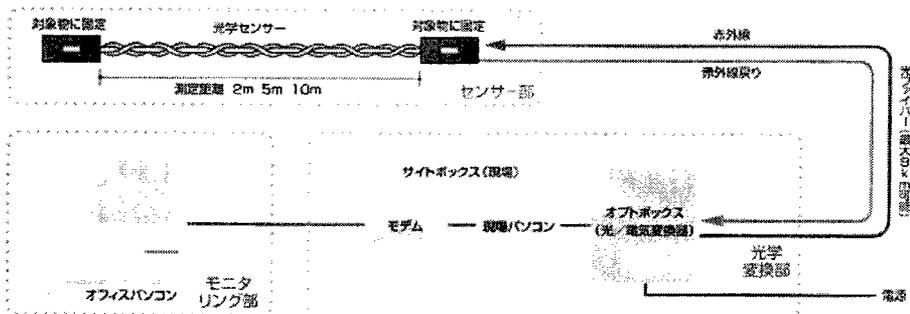


図-1.5 光学ストランドセンサーシステムの基本構

長いセンサーにより構造物のマクロな動きが把握でき、動的/静的測定が1つのセンサーにて測定可能で、長期連続モニタリングも可能である。電話回線等の接続により、遠隔地オフィスでの管理も可能である。

## (2) 導電性塗料

トンネルや高架橋などのコンクリート構造物の劣化が進展し、剥落・落下等による第三者被害の発生する危険性が增大している。こうした構造物の劣化を検査する技術としては、従来打音検査や超音波検査等が用いられてきたが、ここで紹介する導電塗料によるひび割れ検知システムは、直接人手に頼らず構造物の変状を観察できる手法であり、従来技術と比較して以下の特徴を有する。

- ① 簡易・確実にひび割れを検知できる
- ② 常時検知可能である
- ③ 安価である

本手法の概要は、コンクリート構造物表面に導電塗料を回路状(図-1.6 参照)に塗布し、100m 以内程度の1回路に対して1つのひび割れ検知装置を配置して、回路の電気抵抗値の

変化からひび割れを検知するもので、複数のひび割れ検知装置から導通判定信号を携帯電話網を使って管理事務所等へ送信することで、遠隔モニタリングするものである。ひび割れ検知システムの構成概要は図-1.7の通りである。

供試体による検知性確認実験の結果によれば、ひび割れ幅が 0.3~0.6mm を超えると電気抵抗値が急激に変化し、ひび割れの検知可能であることが確認されている。

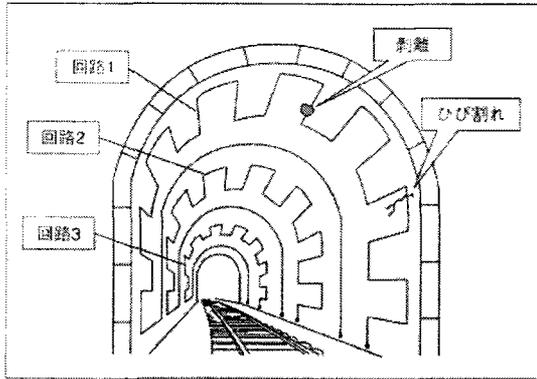


図-1.6 導電塗料塗布イメージ(トンネル)

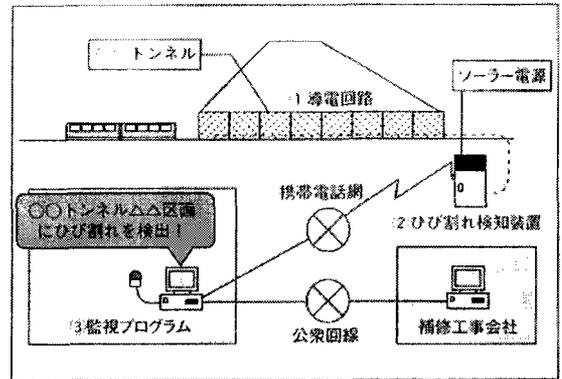


図-1.7 ひび割れ検知システム構成図

### (3) スマートペイント

鋼橋部材の疲労き裂の発見は、現在ほとんど目視検査に依っているのが現状である。しかし、複雑な構造ディテールの有する鋼橋の部材に発生した疲労き裂を現場で発見し、その形状や寸法を特定する作業は容易なものではない。こうした背景に基づいて、疲労き裂の検出率および検出精度を高めるために、現場における目視検査を有効に支援し得る新しい検査技術の開発が望まれている。

米国では、1990年から Smart Paint と呼ばれる特殊な塗料によるき裂検出技術の研究が行われてきた。Smart Paint は、通常のメンテナンス用エポキシ樹脂塗料中に、染料を内包するマイクロカプセルを混合して、金属母材に塗布することにより、き裂の発生・伝搬に伴うカプセルの破壊と共に染料が流出して塗膜表面に発色し、目視によるき裂検出を容易にするというシステムである。(概念図：図-1.8)

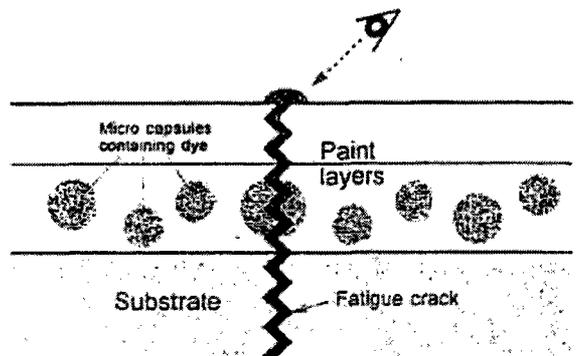


図-1.8 Smart Paint システムの概念

国内においても、船舶部材への適用性を実験的に検証している研究事例がある。染料オイル入りマイクロカプセルと2液混合型エポキシ樹脂系接着剤を用いて、切欠き付平板試験片によるき裂進展試験を実施し、き裂長さ1mm以下の段階から明瞭な発色を確認している。また塗膜厚確保のため、2層塗りのケースにおいても発色を確認することができ、Smart

Paint が目視検査の有効な支援ツールとなり得ることを確認している。ここでは、今後の課題として、染料の耐候性、既存塗膜上への適用性、溶接継手部への適用性を挙げている。

#### (4) 電場指紋照合法

電位差法を応用した電場指紋照合法（Field Signature Method、以下 FSM）は、鋼構造物に生じる腐食やき裂を非破壊的に検出し、それらの進展を監視する技術である。FSM は発電所や各種プラントにおける配管および圧力容器の腐食や応力腐食割れ等の検出に適用されている。また FSM を鋼橋の疲労き裂発生箇所に応用し、き裂進展量および進展速度を常に監視するための実験的研究も行われている。

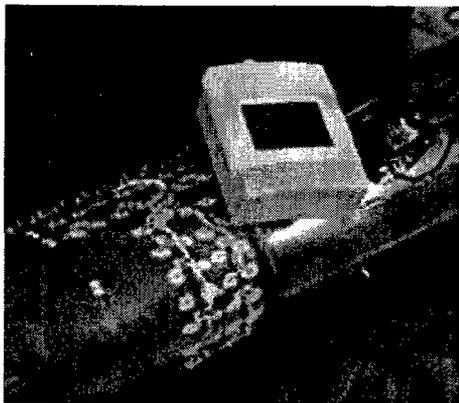


図-1.9 プラント配管のモニタリング

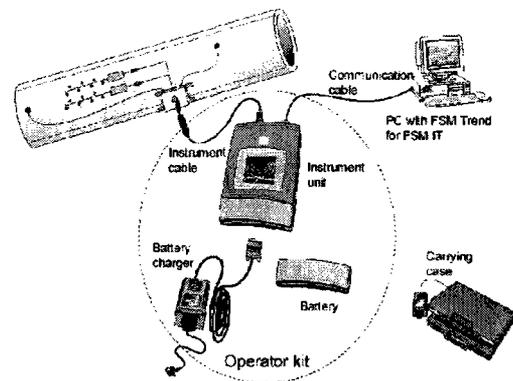


図-1.10 FSM のシステム図

FSM は基本的には ER 法を応用し、多数の電極(センシングピン)を立て、その間の直流パルス電位差を解析する方法である。モニタリング対象物の腐食により減肉、応力腐食割れ(SCC)によるき裂、エロージョン・コロージョンによる肉厚の減少などを外面から測定する方法で、直流パルス電流を印加することで得られたわずかな電位差を求めて、電場パターンをセンシングする方法である。この電場パターンの経時変化を求めることにより実際の腐食状況や腐食速度、腐食傾向並びにき裂の程度や位置を正確に評価する。モニターしたいエリアに多数の電極(センシングピン)を設置し、その各々の2極間の測定電圧を、参照電極(温度と電流のゆらぎを補正するための照合電極)の測定値と比較し、さらにモニタリング開始時の初期値=FS(電場指紋)と比較をすることにより非常に高精度に内部の状態をモニタリングします。

FSM を供用下の鋼橋に適用するには、モニタリング開始前に構造物に接近して、センシングピン、電極等をモニタリング箇所に設置する必要があるが、以後は足場を組むことなく継続してモニタリングできることが特長である。

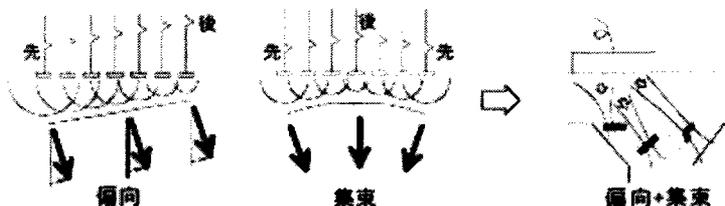
#### (5) 超音波探傷法（フェイズドアレイ法）

厚板の継手やT型継手、現場での溶接継手部検査などに超音波探傷法が適用されているが、従来からの検査技術者の走査による探傷（手探傷）では、技術者の技量に依存する部

分が大きく、探傷結果の記録性や再現性に乏しいという問題があった。また橋脚隅角部のような複雑な構造の溶接部では検査自体が難しい。これらの理由から、より検出性能の優れた探傷法として、原子力施設などで採用されているフェイズドアレイ法の橋梁（特に鋼製橋脚隅角部）への適用検討が進められている。

フェイズドアレイ法とは、小さな振動子を多数配列した探触子を用い、各振動子の送信タイミングを電子的に制御することで超音波の波の位相を制御し、超音波ビームを任意に集束、偏向させることが可能な探傷法である。（図-1.11 参照）

隅角部の角部など複雑に溶接線が交差する箇所は、溶接部に発生するきずの形状、寸法、種類、位置などが様々であるため、きずの

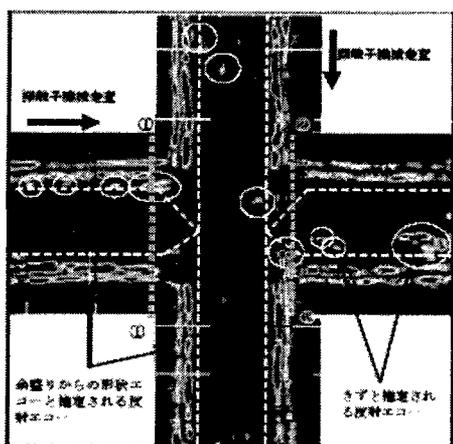


検出には複数の入射角が任意に選択でき、任意の深さへ集束が可能であるフェイズドアレイ法が有効であると考えられる。

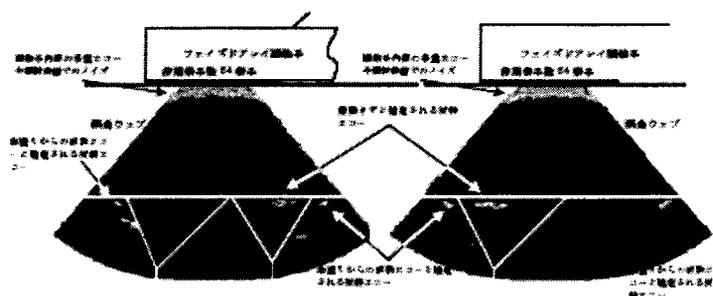
図-1.11 フェイズドアレイ探傷イメージ

通常の手探傷による超音波探傷法で使用する探触子は、探触子毎に入射角度（屈折角）、集束深さが固定であるため、反射面の傾きや深さ位置などが、探触子の条件と合致しなければ検出が困難である。これに対してフェイズドアレイ法では、電子制御により複数の角度での入射、集束深さ位置の変化が可能であるため、検出率が向上すると考えられる。ただし、集束時のビーム幅や深さ範囲、角度による感度差などを考慮し、入射角度、集束深さピッチなどを設定しなければ、きず検出の条件に合致した超音波ビームが入射されず、きずを見逃す恐れもある。

図-1.12 は隅角部試験体の3線溶接線交差部に内在する未溶着を対象にフェイズドアレイ法による探傷事例を示している。探傷断面画像（Bスコープ画像）と製作図面による開先形状を重ね合わせると、試験体に内在していると推定される未溶着と余盛り形状からの反射エコーと対応していることが読みとれる。



(a) Cスコープ画像



b) ①-①断面のBスコープ (c) ②-②断面のBスコープ

### 図-1.12 フェイズドアレイ法による探傷

橋梁分野におけるフェイズドアレイ法による超音波探傷技術は、試験体を対象とした性能確認試験が行われ、試験結果の分析が開始したところである。今後、実橋での適用に向けて、検出性能や精度の向上、現場での適用性確認、コスト低減等のさらなる検討が必要である。

## 3. 2 展望

既設橋の実態把握に向けて、維持管理業務の中でも点検・調査の位置づけは益々重要なものになってくる。しかし現状の点検・調査の実態は、点検員が現地に赴き、遠望目視による広範囲な点検・調査や、足場設備を使用した上で近接目視および検査機器による調査を行うなどの、点検員の多大な労力と費用的な問題が顕在している。また点検員の技量差による点検・調査結果の客観性の問題も指摘されている。

新技術を活用した遠隔モニタリングはこうした現状の問題を解決すべく、構造物に設置したセンサー類と通信技術の活用により、管理事務所等において遠隔地の橋梁の健全度を精度よく効率的に把握する期待技術であるといえる。

こうした遠隔モニタリングに関する新しい技術の開発、発展に対して期待するところは大きく、3. 1で紹介した新技術などは、他分野実用技術の橋梁分野での適用や今後の技術進歩が望まれているといえる。

ただし新しい技術の開発、発展に対する期待は大きいですが、点検・調査の方法は、「早く・安く・簡単に・確実（正確）に」が基本原則であることを忘れてはならない。いくら精度が高く効果的なものであっても、トータルとして高コストの技術は時代の趨勢からして採用されないと考えてもよい。

またデジタル化技術の発展により、大量のデータを容易に扱えるようになったが、前述した通り、目的の不明確さから現状のモニタリングはデータを集めただけになっているきらいもある。蓄積した膨大なデータを以下に効率よく、必要な情報として取り出し、いかに有効に活用していくかが今後の維持管理のポイントであり、こうした解析・評価技術の進歩にも期待したい。

遠隔モニタリング技術の発展・進歩は、構造物の状況を精度よく有効な情報（データ）として蓄積し、必要情報を効率よく解析・評価して既設橋の実態把握に大きく貢献すると考えられる。また、これらを余寿命評価や効率的・効果的補修・補強計画に反映していくことが、ライフサイクルコストの低減をもたらし、ひいては最適な予算配分につながり、今後のアセットマネジメント発展の第一歩になるのではなかろうか。

## 参考文献

- 1) ひずみ分布測定光ファイバセンサの鋼橋梁モニタリング適用性, 水ノ上・三木, 土木学会第 55 回年次学術講演会, 2000.9
- 2) 光ファイバーによるモニタリングシステム(OSMOS)の特徴と有効性, 能登・中島・渋谷, 宮地鐵工所技報, 2000 年
- 3) 光ファイバーセンサーを利用した道路管理, 関, 日本道路会議論文集, 2001.10
- 4) 計測リサーチ株式会社 HP, <<http://www.krcnet.co.jp>>, (参照 2005.1.10)
- 5) 導電塗料を用いたひび割れ検知システム, 川口・竹田・横尾・小櫻, 横河ブリッジグループ技報, 2004 No33
- 6) 検査用塗料による疲労き裂の検出, 高橋・牛島・秋山・高田・古谷, 平成 14 年度 (第 2 回) (独)海上技術安全研究所 研究発表会講演集, 2002.6.20
- 7) 電場指紋照合法による疲労き裂進展のモニタリング, 奥・金・有田・堀川, 溶接構造シンポジウム 2004 講演論文集, 2004.11
- 8) 鋼製橋脚隅角部を対象としたフェイズドアレイ探傷法の基礎検討, 藤木・村越・高橋, 土木学会第 59 回年次学術講演会, 2004.9

#### 4. おわりに

第1編「点検・調査」でのテーマは、「既設橋の実態を把握するため、点検・調査の観点から最新モニタリング手法・現状把握・失敗事例等を整理した上で、評価するために必要なデータを抽出し、実橋への適用方法を検討、提案する。」であった。

本編ではこれまでの点検・調査手法に加えモニタリングについても紹介したが、「モニタリング」という用語は定着しているようであるが定義としては曖昧なまま各種構造物や各分野の用途に応じて用いられている。そのため、橋梁に特化したこの報告書では供用後の点検・調査の一手法として捉え整理した。新技術の紹介では、どこまでが既存技術でどこから新技術であるかの区分についても判断に迷うところがあり、2章、3章と重複して記述している箇所もある。技術の進展が目ざましく、新技術と言われているものがすぐに陳腐化してしまうことも踏まえ、ご容赦して頂きたい。

これまでの50年橋梁から100年橋梁の時代へと変わり、ますます維持管理が重要となり長期間に渡って監視するモニタリング（遠隔モニタリング）の分野の技術の進展が望まれる。一方、近接して手で触ってみることも大切で、そのための検査路などの点検設備を充実させることも重要である。