

## 第 2 回新都市社会技術セミナー

### 研究報告 3

「既設建造物の延命化技術に関する研究」

プロジェクトリーダー 小野 紘一（京都大学大学院工学研究科教授）

平成 16 年 11 月 10 日

新都市社会技術融合創造研究会

新都市社会技術融合創造研究会  
「既設構造物の延命化技術に関する研究」  
- 平成 16 年度中間報告書 -

(案)

平成 16 年 11 月 10 日  
延命化プロジェクトチーム

## はじめに

コンクリート構造物は堅固であり、耐久性や耐火性にも優れているため、半永久的であると言われてきた。我が国では、とくに第二次世界大戦後に多様なコンクリート構造物が大量に建設され現在に至っている。しかし、年月が経過するにつれて、道路橋コンクリート床版のひび割れ、構造物からのコンクリート片の剥離や剥落、トンネル覆工の火災による損傷や崩壊、高架橋などの地震による損壊や倒壊、塩害やアルカリ骨材反応によるコンクリート構造物の損傷など、半永久的といわれてきたこれらコンクリート構造物にも様々な問題や弱点が露見し、100年の長きにわたる社会資本の健全な維持が危ぶまれている。

我が国においては、スパン 15m 以上でも 14 万を越える橋梁が建設され、今後は、寿命が近づき架け替えなどの対策を余儀なくされる橋梁も増加する。このため、既設構造物の健全性を把握し、効率的な補修・補強を施して橋梁の延命化を図ることは社会インフラ資本の維持に関し得策である。このような背景から、本研究は、橋梁の健全性評価と延命化の補修・補強への効率的投資に資する情報を提供するために実施しているものである。

今年度は実橋のモニタリングや各種補修技術の適用によって、主に次のテーマを実施している。

1. 従来手法や光ファイバ等を活用した計測による橋梁のモニタリングを行い、通行車両数と軸重を把握する基礎技術を検討している。また、これらモニタリングの遠隔モニタリングシステムの基本を開発する。
2. 部材と構造の損傷をベースとして、橋梁の安全性評価手法を検討している。
3. 橋梁点検作業等の機械化、情報化、省力化を目指し基礎技術を調査・整理するとともに実用的な手法を検討している。
4. 補強工事の事前および事後における橋梁の諸数値を計測し、補強効果の検証を行っている。
5. 延命化に資する新工法の提案を行う。
6. 橋梁の維持管理マネジメントへの情報の提供を行う。

本研究プロジェクトは、産学官がそれぞれの機能と特徴を有効に発揮し、道路構造物の延命化に関する研究開発を連携して行っているものであり、このような研究開発体制が今後も維持継続され、そこから生まれる研究や開発の成果が、道路構造物の健全な維持と延命化に貢献することを念願している。

平成 16 年 11 月 10 日  
プロジェクトリーダー  
京都大学大学院工学研究科教授 小野紘一

# 目 次

はじめに

1. プロジェクト参画団体および参加者	5
2. 研究計画と委員会実施工程	6
2.1 研究目的	6
2.2 委員会実施工程	6
3. 橋梁の現状	7
3.1 橋梁の現状	7
3.2 鋼橋の劣化現象	7
3.2.1 鋼材の疲労破壊	7
3.2.2 疲労損傷度	7
3.2.3 プレートガーダー橋における損傷例	8
3.3 コンクリート橋の劣化現象	9
3.3.1 コンクリート部材の疲労	9
3.3.2 塩害	9
3.3.3 アルカリ骨材反応	10
3.3.4 中性化	10
4. 荷重の実態と推定方法	11
4.1 荷重の実態	11
4.2 橋梁を用いた軸重推定 (Weigh-in-motion)	11
4.2.1 軸重推定の概要	11
4.2.2 軸重推定における課題	12
5. 健全度評価手法	14
5.1 健全度評価のフロー	14
5.2 要求性能	14
5.3 健全度評価法の現状	14
5.3.1 部材評価から全体評価への統合	14
5.3.2 健全度評価の実施例	15
5.4 故障モード解析 FMEA による健全度評価	16
5.4.1 部品 (役割) の重要度分類	17
5.4.2 部品の損傷モードの推定とその重要度の分類	17
5.4.3 重要度の算定法	17

6.	モニタリング技術の調査結果	18
6.1	高解像度デジタルカメラと赤外線カメラ（床版ひび割れ監視）	18
6.1.1	概要と計測原理	18
6.1.2	応用例	18
6.2	HV ラインゲージ（変位計測）	19
6.2.1	概要と計測原理	19
6.2.2	応用例	19
6.3	FBG センサ（ひずみ計測）	20
6.3.1	概要と計測原理	20
6.3.2	応用例	20
6.4	OSMOS（2点間変位・ひずみ計測）	21
6.4.1	概要と計測原理	21
6.4.2	応用例	21
6.5	光ファイバシート（床版ひずみ計測）	22
6.5.1	概要と計測原理	22
6.5.2	応用例	22
6.6	オーリス（非破壊検査システム）	23
6.6.1	概要と計測原理	23
6.6.2	応用例	23
7.	補修技術の調査結果	24
7.1	浸透性吸水防止材「マジカルリペラー」	24
7.2	含浸性表面改質材「コロイダルシリカ」	25
7.3	湿式吹付け工法「ジョッツ・クリート工法」	26
7.4	床版取替工法「クイック・チェンジ工法」	27
7.5	疲労き裂部分の供用下における溶接判定技術	28
8.	実橋におけるモニタリング結果	29
8.1	モニタリング概要	29
8.1.1	U橋の概要	29
8.1.2	モニタリングの目的	33
8.1.3	計測項目とセンサ配置	33
8.2	実施結果	36
8.2.1	交通量調査結果	36
8.2.2	部材応答の影響線	36
8.2.3	主桁下フランジの応力頻度評価	37
8.2.4	主桁のたわみと主桁フランジのひずみの整合性	37

8.2.5	主桁下フランジひずみによる荷重分配の検討	38
8.2.6	端横桁における衝撃計測と荷重特性の評価	39
8.2.7	たわみと固有振動数による補強効果の確認	40
8.2.8	床版のひび割れ監視	41
9.	塩害損傷を受ける実橋に対する補修補強技術	42
9.1	塩害の実態	42
9.1.1	S橋の概要	42
9.1.2	外観目視による実態調査	43
9.2	補修計画	44
9.2.1	塩害に対する予防保全	44
9.2.2	塩害による損傷部の断面補修	45

## 1. プロジェクト参画団体および参加者

### 【学】

小野 紘一 *	京都大学	工学研究科都市環境工学専攻	教授
宮川 豊章	京都大学	工学研究科社会基盤工学専攻	教授
杉浦 邦征	京都大学	工学研究科都市環境工学専攻	助教授
服部 篤史	京都大学	工学研究科社会基盤工学専攻	助教授
山本 貴史	京都大学	工学研究科社会基盤工学専攻	助手
大島 義信	京都大学	工学研究科都市環境工学専攻	助手

### 【官】

加藤 俊昌	国土交通省近畿地方整備局	道路部道路管理課	課長
桐野 利夫	国土交通省近畿地方整備局	近畿技術事務所	副所長
山下 一郎	国土交通省近畿地方整備局	道路部道路管理課	課長補佐
大坪 裕	国土交通省近畿地方整備局	道路部道路管理課	維持修繕係長

### 【産】

- WG1 (性能評価技術) -
 

陵城 成樹	(株)ニューゼック	大阪本社道路グループ 橋梁チームマネージャー
長谷川伸二	(株)鴻池組	土木本部技術統括部技術課主任
中山 昭二**	大日本コンサルtant(株)	大阪支社技術統括部技術次長
- WG2 (モニタリング技術) -
 

奥野 正富	NTT インフラネット(株)	関西支店事業開発本部開発企画部部长
橋村 義人	計測技研(株)	技術部技術課主任
小俣 富士夫	ショーホンド建設(株)	補修工学研究所大阪試験室室長
都志 益一	(株)ソーキ	代表取締役
和田 孝史	(株)ソーキ	開発部技術顧問
蓮井 昭則	(株)間組	技術・環境本部技術研究所土木研究室室長
小林 貞之	(株)間組	大阪支店土木部工事課課長
能登 宥愿	(株)宮地鐵工所	技術本部技術研究所常任参与所長
山下 久生	(株)宮地鐵工所	技術本部技術研究所技術開発課課長代理
- WG3 (補修補強技術) -
 

岩井 稔	鹿島建設(株)	土木管理本部土木技術部リニューアルグループ 課長
竹内 和雄	青木あすなる建設(株)	大阪本店見積購買部担当部長
小川 光博	青木あすなる建設(株)	大阪本店技術本部技術部担当課長
金好 昭彦	(株)鴻池組	大阪本店土木技術部部长
大西 豊	佐藤工業(株)	大阪支店土木部門技術グループ 長技術部長
水谷 景洋	東急建設(株)	大阪支店土木統括部工務部長
瀬野 康弘	東急建設(株)	技術研究所土木研究室室長
岩田 節雄	日立造船(株)	技術本部技術研究所鉄構・海洋研究室主席研究員

\* : プロジェクトリーダー

\*\* : 全体幹事長

## 2. 研究計画と委員会実施工程

### 2.1 研究目的

わが国においては、スパン 15m 以上でも 14 万を超える橋梁が建設され、今後は、寿命が近づき架け替えなど対策が必要となる橋梁が増加する。このため、既設構造物の健全性を把握し、効率的な補修・補強を施して橋梁の延命化を図ることが必要である。

本研究は、橋梁の健全性評価と延命化の補修・補強への効率的投資に資する情報を得ることを目的に実施する。

平成 16 年度では、疲労損傷が生じている橋梁（兵庫県内 U 橋）に対して、

- ・ 光ファイバセンサなどの各種センサによる計測モニタリング
- ・ 計測データを用いた通行車両の軸重推定法の検討
- ・ 計測データや数値解析を基にした、故障モード影響解析および感度解析の実施と、橋梁の健全度評価手法の検討
- ・ 計測データに基づいた補修補強効果の確認
- ・ 補修補強の選定工法に関する事後的な妥当性検証

を行うまた塩害による損傷が生じている橋梁（和歌山県内 S 橋）に対して、

- ・ 各種手法による塩害調査
- ・ 選定補修工法の適用と効果の確認
- ・ 補修補強の選定工法に関する事後的な妥当性検証

を行う。

### 2.3 委員会実施工程

	4月	5月	6月	7月	8月	9月	10月
全体会議	4/16 京大	5/18 京大	6/25 京大	7/27 京大		9/3 国民宿舎 (現地)	10/8 京大
主査会	4/7	5/10	6/11	7/23	8/9 8/27	9/2 9/29	10/5 10/22
各 WG				7/23 U 橋計測		9/3 U 橋計測	10/22 U 橋計測

### 3. 橋梁の現状

#### 3.1 橋梁の実態

現在橋長 15m 以上の橋梁は 14 万橋を超過し、その多くは 1960 年代から 1980 年代にかけて建設されている。

また過去に国土交通省管轄の道路橋に関して道路橋架け替えの理由を調査した結果、損傷を受けて架け替えを行った橋梁は 20%弱程度であり、ほとんどは機能上の問題や使用条件の変化などにより架け替えを行っている<sup>1)</sup>。また上部工損傷の内訳は、床版の損傷が半数を占めており、続いて桁の損傷となっている(図 3.1)。鋼橋における損傷は上部工の床版疲労が主であり、PC・RC 橋においては床版疲労と主部材の塩害や中性化によるコンクリート材料の劣化が主となっている。また下部工においては、橋脚などのコンクリートが塩害や中性化で損傷を受けているものが主である。ただし関西においてはアルカリ骨材反応も比較的多い損傷である。

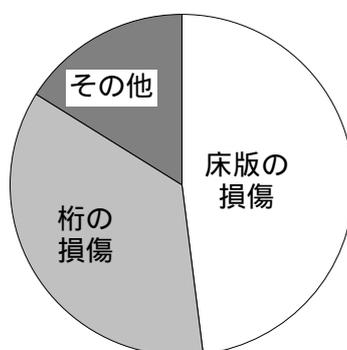


図 3.2 道路橋架け替えの理由

#### 3.2 鋼橋の劣化現象

##### 3.2.1 鋼材の疲労破壊<sup>2)</sup>

疲労現象は、ある材料が静的強度以下の応力であっても、繰り返し作用を受けることにより破壊に至る現象である。特に鋼材では、比較的低い応力を繰り返し受けると微細な亀裂が発生し、応力集中により亀裂が徐々に進展し安定成長する。最終的に応力集中した部分が静的強度を超えて破壊に至る。

疲労に大きく影響する要因は、繰り返される応力の変動幅と繰り返し回数である。応力範囲と疲労寿命の関係は両対数で直線を示すことが知られている。この関係を材料の疲労試験より求めて疲労設計に反映しているが、得に継手部分に対しての検討が詳細に行われる。

鋼橋において確認されている疲労損傷の多くは、二次部材の接合部に発生している。これらの損傷は、一般的な設計手順では計算対象外となる部分に、応力集中、面外変形、二次応力などが重複して発生することが主な原因となっている。

##### 3.2.2 疲労損傷度<sup>5)</sup>

鋼材の疲労現象に関して現在まで種々の被害理論が提案されているが、特に実用的なものとし

てマイナーにより提案された線形被害則がある。この線形被害則はマイナー則とも呼ばれ、累積される疲労被害が、毎回加えられる変動応力範囲のみに支配されるものと仮定すれば、応力範囲の繰返し数に対して累積される疲労被害の量が対数上で線形をなすというものである。マイナー則では、一定応力範囲での疲労試験において応力範囲が  $S_i$  ( $i=1, 2, \dots, k$ ) での破壊までの繰返し数を  $N_i$  とし、実際に繰返し作用した回数を  $n_i$  とした場合に、下式が満足されたときに破壊が生じるとしている。

$$D = \sum_{i=1}^k \left( \frac{n_i}{N_i} \right) \quad (3.1)$$

ここで、 $D$  は累積疲労損傷度と呼ばれる。あらかじめ実験によって材料の  $S-N$  曲線が得られていれば、任意の応力範囲に対しての  $N$  が既知であるといえるから、実部材での応力範囲を測定しその頻度を用いて累積疲労損傷度が求まることになる。

### 3.2.3 プレートガーダー橋における損傷例<sup>2)3)</sup>

上路プレートガーダー橋で発生する深刻な疲労損傷は、支点上のソールプレート前面すみ肉溶接部に発生する亀裂である（図3.2）。

他方、主桁ウェブに関しては、主として面外変形に起因するいくつかの亀裂が発生している。対傾構を取り付けた垂直補剛材の上端部付近では、補剛材側およびウェブ側の両者に亀裂が発生している。横構ガセットプレートの接合部についても同様であり、横構の面外振動や軸力の作用により、ウェブ側、ガセットプレート側の両者のすみ肉溶接止端部に亀裂が生じやすい。特に横構取り付けガセットプレート端部付近に発生する亀裂については、曲線橋や斜橋の桁端部において二次応力である主桁面外方向の力により多く発生しているが、近年直線橋のスパン中央部付近での亀裂が報告されている。この場合、亀裂は一時応力に直交するものであり、進展した場合危険である。

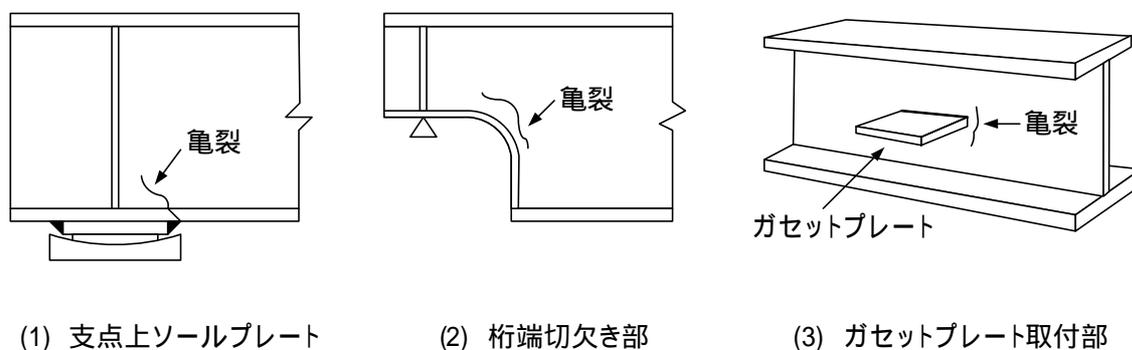


図 3.2 亀裂の発生箇所

ウェブに発生する亀裂では、他に桁端切り欠き部の下フランジとウェブを接合する溶接部から発生する亀裂が多い。

また全体剛性の低下は、それ自体が直接的に崩壊に結びつくものではないが、二次応力の発生を助長し亀裂発生の要因となるため、長期的耐力に関する安全性の基準として重要であると思われる。

### 3.3 コンクリート橋の劣化現象<sup>1)</sup>

#### 3.3.1 コンクリート部材の疲労

コンクリート部材のうちで RC 床版の疲労損傷は、鋼橋においても主たる損傷である。床版疲労は床版下面の状態に応じて以下の 4 つの状態に分類される<sup>3)4)</sup>。

##### 1) 状態 : 一方向ひび割れ (潜伏期)

床版上に輪荷重が作用すると、主筋方向および配力筋方向に曲げモーメントが生じる。したがって床版下面では、この曲げモーメントと乾燥収縮等による引張応力が作用して、主筋方向にひび割れが発生することが多い。特に配力筋が少ない床版では、ひび割れ幅も大きくなる。

##### 2) 状態 : 2 方向ひび割れ (進展期)

主筋一方向にひび割れが発生すると、配力筋方向の曲げ剛性が主筋方向の曲げ剛性に比べてかなり小さくなり、床版の性状は等方性から異方性に変化する。すなわち曲げモーメント分配率が変化し、主筋方向への曲げ作用が大きくなるとともに、せん断やねじり抵抗が小さくなり、配力筋方向のひび割れが進展する。

##### 3) 状態 : 亀甲状のひび割れ (加速期)

繰り返し荷重によりひび割れの微細化が進み、二方向ひび割れが深さを増しながら床版全体へと進展する。このときひび割れが貫通すれば、遊離石灰が生じることになる。また、20～30cm 角程度の亀甲状のひび割れまで進展すれば、ひび割れ密度は停留するが、ひび割れ端面では角落ちが急速に進む。

##### 4) 状態 : ひび割れの貫通と抜け落ち (劣化期)

二方向のひび割れがさらに進展すると、ひび割れが床版を貫通し、鉄筋のみで荷重を支えることになる。このまま荷重の作用が続くと、コンクリートの剥離や抜け落ちが生じる。

#### 3.3.2 塩害

塩害とは、コンクリート中の鋼材の腐食が塩化物イオンの存在により促進され、腐食生成物の体積膨張がコンクリートにひび割れや剥離を引き起こしたり、鋼材の断面欠損などを引き起こしたりすることにより、構造物の諸性能が低下する減少である。

塩化物イオンは、海水や凍結防止剤など外的な要因により浸入する場合と、製造時にコンクリート中に含まれている場合がある。

塩害のメカニズムは、コンクリート中の空隙に塩化物イオンが拡散する過程から始まる鋼材位置の塩化物イオン濃度がある程度以上になると、鋼材の不動態皮膜が破壊され、水分と酸素の供給により腐食が生じる。腐食が進行すると、コンクリートにひび割れが生じ、ひび割れを通

して酸素等の供給量が増加し、さらなる腐食の進展によりひび割れの拡大や剥離が生じる。また鉄筋の断面欠損により耐荷力の低下が生じる。

### 3.3.3 アルカリ骨材反応

セメントに含まれる酸化ナトリウムや酸化カリウムなどのアルカリは、セメントの水酸化アルカリとなるため、コンクリートの細孔溶液は PH13 程度の強アルカリ性の水溶液となる。ある種のシリカ好物や炭酸塩岩を含む骨材は、コンクリート中の高いアルカリ性の水溶液と反応し、コンクリートに異常な膨張およびそれに伴うひび割れを発生させることがある。これがアルカリ骨材反応と呼ばれるもので、アルカリシリカ反応とアルカリ炭酸塩岩反応と 2 種類があるが、日本で報告されている被害はおもにアルカリシリカ反応である。

アルカリシリカ反応による構造物の劣化は、骨材中に含まれる反応性シリカ鉱物とコンクリート中の水酸化アルカリを主成分とする水溶液との化学反応により、アルカリシリカゲルが生成されることに起因する。アルカリシリカゲルは、骨材周囲より水分を吸収し膨張する。この膨張により骨材のみならず、セメントマトリクスの崩壊を引き起こし、大きなひび割れへと進展する。結果として鋼材腐食やコンクリート自体の劣化を生じさせ、耐荷力低下を引きこすことになる。

### 3.3.4 中性化

中性化は、空気中の二酸化炭素がコンクリート内部に侵入し、炭酸化反応を起こすことにより細孔溶液内の PH が低下する現象である。これにより、コンクリート内部の鋼材が腐食する可能性が生じる。鋼材の腐食進展により、ひび割れの発生、かぶりの剥落、鋼材の断面欠損等により構造物の耐荷力が低下する。また中性化は、細孔構造の変化などを伴うため、コンクリートの強度変化などを引き起こす可能性もある。

中性化では、まず水分が散逸した細孔中に二酸化炭素が浸入し、細孔内の溶液に溶解することで炭酸イオンを生成する。その後炭酸イオンがカルシウムイオンと反応して水溶液の PH が低下し、鉄筋表面の不働皮膜が破損したり、コンクリート自体の強度が低下したりすることで、構造物の耐荷力が低下する。鉄筋腐食による構造物の耐力低下は、塩害と同様である。

## 参考文献

- 1) 土木学会メンテナンス工学連合小委員会：社会基盤メンテナンス工学，東京大学出版会，2004.
- 2) 土木学会鋼構造委員会：鋼橋における劣化現象と損傷の評価，丸善(株)，1996.
- 3) (財)阪神高速道路管理技術センター：損傷と補修事例にみる道路橋のメンテナンス 阪神高速道路，(株)山海堂，1993.
- 4) 土木学会コンクリート委員会：コンクリート標準示方書（維持管理編），土木学会，丸善(株)，2001

## 4. 荷重の実態と推定方法

### 4.1 荷重の実態

疲労損傷度の評価など構造物を評価する上で、荷重の実態を明らかにする必要がある。死荷重に関しては、設計段階においても比較的正しく評価が行えるが、活荷重には動的効果が含まれるため、モニタリング等によりこの動的効果を正しく評価する必要がある。

#### 1) 動的増幅率<sup>1)</sup>

一般に動的影響は、静的応答に対する動的応答の比として定義される動的増幅率により表現される。また道路橋示方書などでは、動的効果を衝撃とみなして係数を定義し、静的荷重に係数を割り増しして設計を簡便化している。

#### 2) 実働応力と計算応力度

動的効果を考慮した場合でも、実際に橋梁に作用する応力は設計時に想定しているものとは異なっている。なぜなら設計時には、中間対傾構、横構などの2次部材の効果を考慮していないこと、地覆、高欄部を無視していること、RC床版による荷重の再配分を考慮していないこと、非合成床版が合成化していることを考慮していないことなど、様々な理由が挙げられる。また様々な研究機関において、設計時応力と実働応力（実際に作用している応力）との差異に関する研究が行われている<sup>2)3)</sup>。その結果、実際の走行車両群からの動的効果や連行などの要因を含めて荷重を評価した場合、設計時の2~5倍の応力が作用していることが分かっている。一方、実働応力の動的要因を除いた部分に対して、設計計算との差異を示す指標として設計計算応力補正係数または実応力比が用いられている。例えば鉄道橋においては、疲労照査における補正係数を構造解析係数として0.85を示している<sup>4)</sup>。

### 4.2 橋梁を用いた軸重推定 (Weigh-in-motion)

#### 4.2.1 軸重推定の概要

平成5年度には大型車両の積載物重量制限が最大20トンから25トンへと緩和され、また平成6年には設計荷重がB活荷重へ移行したことも含め、車両の実重量への関心が高まっている<sup>6)</sup>。また疲労損傷の原因究明や寿命予測という観点からも、橋梁に作用する荷重を明確に把握する必要がある。現在、過積載のトラックの走行など、道路や橋梁に想定以上の重量が作用し、急激に構造物の損傷が増加している。構造物の安全上、さらには行政的な理由により車両総重量などを検知する必要があり、現在まで様々な軸重測定が行われてきた。軸重推定の方法は、計測の原理により以下のように大別される。

#### 1) 直接法：計量台などにより直接軸重を計測する方法。(トラックスケール、軸重計など)

2) 間接法：車両通行に伴う橋梁の応答などにより間接的に軸重を推定する方法。

直接法の例としては、高速道路の料金所入り口などに埋設されている軸重計がある。ここで使用されている軸重計は比較的低速（20km/h 以下）で計測を行うもので、車両が必ず低速走行する場所にのみ設置が可能である<sup>1)</sup>。一方、間接法として代表的な方法は、橋梁の応答を用いた軸重推定法（BWIM）である。この方法は、直接法に比べて安価なシステムとして研究が進められている。BWIM は、手法別にまとめると表 4.1 のようになる。

表 4.1 軸重推定研究の動向

方式	原理	着目部材	特記事項
I <sup>7)</sup>	主部材の影響線を利用。影響線を多項式近似し、応答地との誤差最小により軸重を推定。	主桁下フランジ : 影響線応答 垂直補剛材 : 軸数, 車線の判別 光スイッチ : 車速の判別	車速（車両位置）の判別が必要。連行, 並行した場合に誤差が大きくなる。
II <sup>8)</sup>	縦桁の影響線を利用。応答値の面積が車両総重量に比例することを利用。	縦桁 : 影響線応答, 車速の判別	車速（車両位置）の判別が必要。同時載荷（連行, 並行）の場合推定が困難
III <sup>9)</sup>	支点反力の影響線を利用。応答値の落差が軸重に対応する点に着目。	垂直補剛材 : 影響線応答	車速判別不要。垂直補剛材のない構造には適用不可。
IV <sup>10)</sup>	RC 床版のひび割れ幅の変動と車両軸重の相関から軸重を推定する。	床版 : ひび割れ幅応答	車速判別不要。精度を高めるには、多くの測点を必要とする。
V <sup>11)</sup>	たわみの応答と軸重の相関を GA により推定する。	たわみを発生する部材全て : たわみ応答	車速判別不要。同時載荷の場合適用不可。実橋による検証例がない。
VI <sup>12)</sup>	主部材の影響線を利用。影響線を直線近似する。方式 I に準ずる。	主桁 : 影響線応答 床版 : 車速, 車線, 軸数の判別	車速（車両位置）の判別が必要。同時載荷の影響が大きい。

#### 4.2.2 軸重推定における課題

BWIM による軸重推定では、車両の走行状態により推定精度が大幅に変化する。また軸重、

車両の総重量，軸距の推定精度はそれぞれで異なる．まず BWIM の推定精度を低下させる要因として，車両の連行・並走などの同時載荷の影響が挙げられる．特に多主桁で車線も多い橋梁を用いる場合は，連行や並走が生じる確率が高い．連続桁などの場合も，部材によっては影響範囲が大きくなり，同時載荷の影響を受けやすい．同時載荷の状況と分類を図 4.1 に示す．

また他にも推定誤差を発生させる要因として，車両走行時の振動とアスファルト等の舗装剛性変化がある．さらに車両走行位置に関しても，走行位置が異なれば部材に分配される応力も異なり，同じ軸重に対しても応答値が変化する．よって正確な推定には走行位置も考慮する必要がある．またヨーロッパでは，軸重推定に関するユーロコードの作成への取り組みが始まっている<sup>13)</sup>．

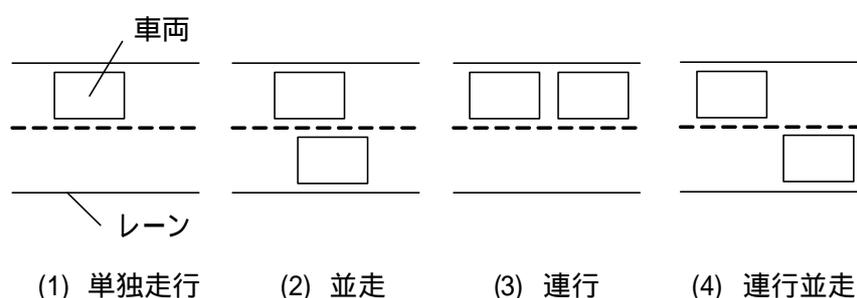


図 4.1 同時載荷の影響

#### 参考文献

- 1) 土木学会橋梁振動モニタリング研究小委員会：橋梁振動モニタリングのガイドライン，丸善(株)，2000.
- 2) 鈴木博之：実橋の応力測定結果の活用に関する 2，3 の考察，鋼構造年次論文報告集 第 8 巻，717-722，2000.
- 3) 鈴木博之：道路橋の実応力比に関する調査報告，鋼構造年次論文報告集 第 3 巻，155-162，1995.
- 4) 鉄道総合技術研究所：鉄道構造物等設計標準・同解説 鋼・合成構造物，1992.
- 5) 日本材料学会：機械・構造系技術者のための実用信頼性工学，養賢堂，1987.
- 6) 小野敏郎：走行車両の重量計測 - 軸重計測の現状と課題，計測と制御 第 37 巻 第 2 号，123-128，1998.
- 7) 三木千壽，村越潤，米田利博，吉村洋司：走行車両の軸重測定，橋梁と基礎，1987-4，41-44，1987.
- 8) 小塩達也，山田健太郎，小林直人，水野良浩：鋼 I 桁橋の縦桁を用いた Bridge Weigh-in-Motion システムの開発，構造工学論文集，Vol.47 A，1083-1091，2001．
- 9) 小塩達也，山田健太郎，貝沼重信，小幡敏幸，古市亨：鋼床版部材を用いた走行車輪の軸重推定，構造工学論文集，Vol.44 A，1141-1151，1998.
- 10) 松井繁之，A. El-hakim：RC 床版のひびわれの開閉量による輪荷重の測定に関する研究，構造工学論文集，Vol.35 A，407-418，1989．
- 11) 中谷昌一，玉越隆史，中洲啓太，石尾真理：橋梁を用いた車両重量計測システムの開発，土木技術資料 44-12，62-67，2002.
- 12) 米田昌弘，枝元勝哉：遺伝的アルゴリズムを適用した Bridge Weigh-in-motion システム，構造工学論文集，Vol.50 A，707-718，2004.
- 13) COST323 “Weigh-in-Motion of Road Vehicles” Final Report, 1999.8.

## 5. 健全度評価手法

### 5.1 健全度評価のフロー

維持管理における性能照査の考え方は土木学会<sup>1)</sup>によると図5.1のように示される。すなわち、健全度評価は点検結果をもとに点検時と予定供用期間終了時において安全性能、使用性能、第三影響度に関する性能、美観、景観を評価し、要求性能との比較により照査することとなる。

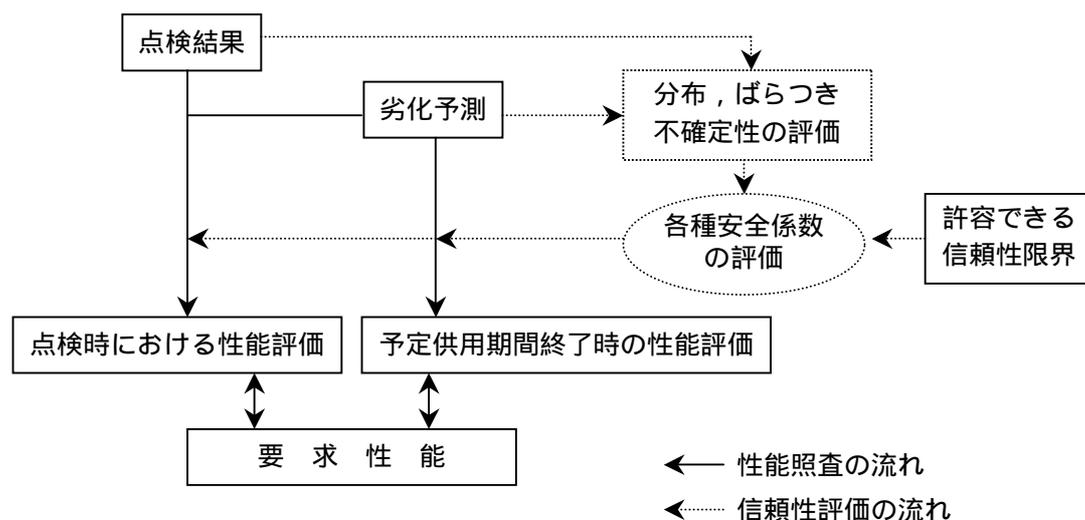


図 5.1 性能照査フロー

### 5.2 要求性能

構造物の要求性能は安全性能、使用性能などに分類されるが、今回のプロジェクトで定量的な評価が可能な安全性能と使用性能を橋梁の要求性能と定義する。安全性能については、耐震性能を含めた部材の耐荷性状に関する安全性と、構造系の崩壊などの安全性を意味する。また使用性能に関しては、構造系としての変形状、排水性などの機能性、さらには使いやすさといった利便性などを含むが、ここでは構造系のたわみや支承部の変位などの変形状を指すものとする。

### 5.3 健全度評価手法の現状

#### 5.3.1 部材評価から全体評価への統合

部材の損傷度を評価する場合、5段階評価のランク付けを行えば、現在まで蓄積されている橋梁点検台帳の情報を利用できる。またそれ以外にも詳細検討時に行われる構造計算法があり、部材の評価を強度低下や鋼材の残存断面量をもとに設計計算により求めるものであるが、個々の部材の安全性を高い精度で評価することが可能である反面、かなりの詳細調査が必要である。

全体系の評価は、個々の部材の評価と全体系の評価との関連性が不明確であり、また部材評価の精度も部材や損傷によって異なるため、容易なものではない。そのため様々な方法が提案されているが、基本的には次の二つの方法に大別される。

- 1) 加重平均法：部材の重要度などを加味して重みを定義し、個々の部材の評価を点数化したものに乗じて総和をとる方法
- 2) 減点法：各部材の損傷度を点数化し、満点から減点していく方法

減点法では、減点の限度を設けるなどして部材ごとの差異を出しているものの、重要部材の損傷と2次部材などの損傷を同列に扱うことになる。加重平均法に関しては、部材全体の評価を広く反映するものであるが、部材の重要度すなわち重みをいかに合理的に評価するかが重要となる。ただし加重平均法では、一部に著しい損傷を受けていても欠陥の評価が重みにより薄められてしまうという指摘もある<sup>2)</sup>。

合理的な重みの定義に関しては、熟練技術者のアンケートに基づく数量化理論を用いてのアプローチを行っている例がある<sup>3)</sup>。これは、各部材の評価と橋梁全体の評価を個別に行い、数量化理論により部材評価と全体評価の因果関係を発見する方法である。

### 5.3.2 健全度評価の実施例

米国 AASHTO において用いられている橋梁管理用のシステム PONTIS では、資産価値としての橋梁健全度指数 BHI ( Bridge Health Index ) を初期資産 ( 建設費 ) と現在資産 ( 建設費 ) の比で定義している。ここで初期資産は全ての部材が健全な状態での ( 建設当初 ) の橋梁全体の建設費であり、現在資産は現在 ( 部材に損傷を有する状態 ) の橋梁全体の建設費である。資産はそれぞれの部材単価とその総数の積和となる。また資産価値の低下は単純に損傷度合いに比例するよう設定されている。

また横浜市<sup>4)</sup>では、橋梁保全の優先度評価を「橋梁の健全度」および「橋梁の重要度」を定量的に算定し、これらを用いて総合的に評価を行っている。橋梁の健全度に関しては、各部材の点検結果を総合評価した指数、横浜橋梁健全度指数 YBHI により評価している。YBHI ( Yokohama Bridge Health Index ) は、橋梁の要求性能を定義して、各部材が各要求性能に及ばず影響度を重み係数として設定し、加重平均法により算定する。一方、橋梁の重要度については、横浜橋梁重要度指数 YBPI ( Yokohama Bridge Public Index ) により評価する。YBPI は、路線の重要度、交通量に着目して重み係数を設定し、加重平均法により算定する指標である。最終的に橋梁保全更新の優先度  $P$  を、橋梁健全度指数 ( YBHI ) の減少分と橋梁重要度指数 ( YBPI ) により評価し、優先順位を決定している。

また東京都<sup>5)</sup>では、定期点検時の総合健全度評価法として、鋼橋とコンクリート橋それぞれについて耐久性と耐荷性を指標とした評価法を採用している。ここでは、上部工、下部工、支承等の書く部材ごとに点検項目を定め、それに基づき損傷度の判定を行っている。さらに部材および要求性能 ( 耐荷性・耐久性 ) に応じた重みを定め、耐久性と耐荷性の指標をそれぞれ求める。最終的には二つの指標を変数とする判定図を用いて健全度を評価している。

#### 5.4 故障モード解析 FMEA による健全度評価

橋梁の信頼性評価方法（案）の全体的なフローを図 5.2 に示す。本方法の基本的な考え方は、橋梁の現状から劣化度を評価する場合、各機能別に評価しようとするものである。

したがって、まず橋梁の機能分析を実施し、各機能にかかわる構成品、および部品を整理する。次に、整理された部品の損傷の程度を現地で調査し、橋梁の現状をその橋梁の有している機能別に評価し、改修の要否を検討するとともに、劣化度評価レベルに応じた延命化対策をはかる。ここでは各損傷の影響度を決定し、個別の損傷度を統合する必要があるが、荷重の実態や亀裂の可能性などを考慮して、部材の影響度を決定する。模式的に健全度評価式を表現すれば、以下の式のようなになる。ただし最終的に、損傷の無い状態での健全度が 100 となるように係数を調整する必要がある。

$$\text{全体の健全度} = \sum \text{部材の重要度} \times \text{損傷モードの重要度(寄与率)} \times \text{部材の損傷評価} \times \text{作用荷重の評価} (\times \text{補正係数})$$

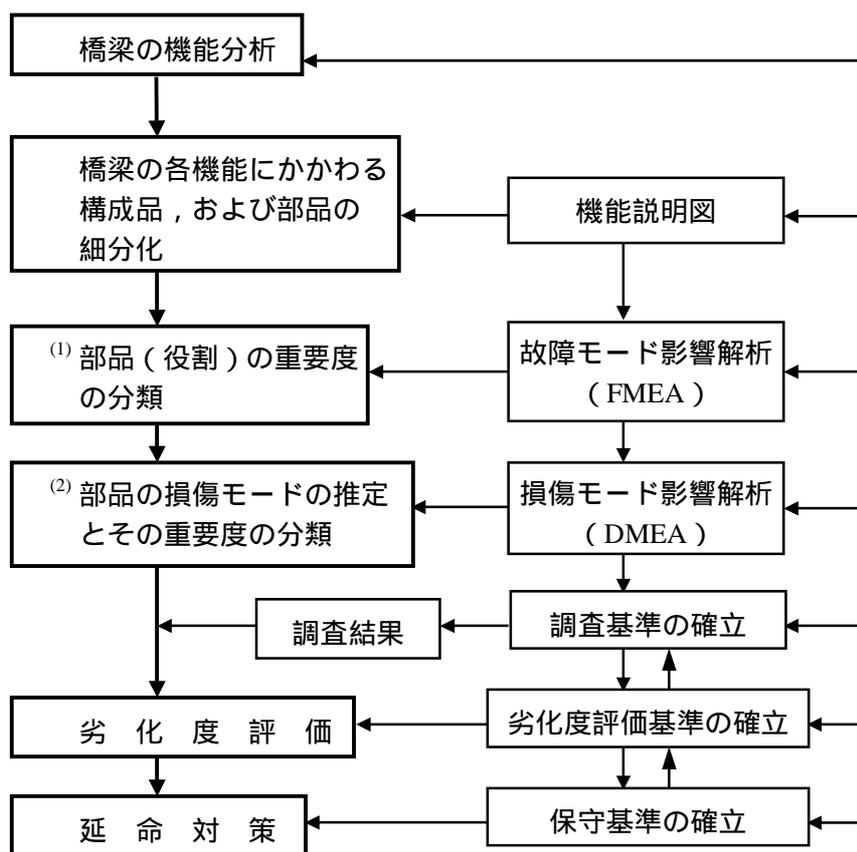


図 5.2 橋梁の信頼性評価体系の全体手順フロー（案）

#### 5.4.1 部品（役割）の重要度分類

故障モード解析(FMEA ,failure mode and effects analysis )により ,部品の重要度の分類を行う . 部品の重要度 ,および故障モードの重要度は ,部品の影響度と構成品の影響度の両方を考慮して4ランクで表示する .ここで ,故障モードとは ,部品の持つ役割がほとんど喪失する状態のモードのことである .

#### 5.4.2 部品の損傷モードの推定とその重要度の分類

損傷モードの影響解析 ( DMEA , damage mode and effects analysis ) により , 故障モードにかかわる損傷モードの重要度の分類を行う . 部品の故障モードに対する各損傷モードの重要度は , 3ランクで表示する .ここで , 損傷モードとは , 部品の持つ役割が余裕を持って機能している状態と , ほとんど喪失している状態の間にある状態のモードのことである .

#### 5.4.3 重要度の算定法

従来 , 部材の損傷度評価や重要度に関しては , 点検における4段階評価などにに基づき点数化を行ってきた . しかし本プロジェクトではより合理的な評価を与えるため , 劣化状態を力学モデルにより表現し , 劣化状態が要求性能に与える影響度により点数化を行う . すなわち , 要求される橋梁機能を表現できる有限要素モデルを構築し , 擬似損傷を与えて機能低下を定量的に評価する . 図5.3に有限要素モデルの一例を示す . 例えば支障の損傷に対する寄与率を算定する場合 , 支障機能に相当する数理モデル上の境界条件を変化させ , たわみ量 ( 使用性 ) や部材の安全率 ( 安全性 ) など橋梁の機能の変化量を数値化する . また作用荷重の評価は , モニタリング等で得られた結果より重量車の混入率などで決定する .

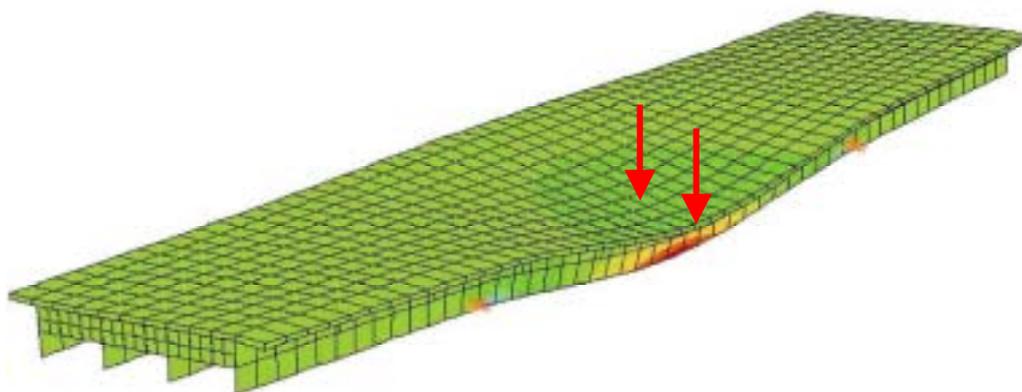


図 5.3 有限要素モデル

#### 参考文献

- 1) 土木学会：コンクリート標準示方書 維持管理編，2001.
- 2) 佐藤弘史，荻原勝也：橋梁マネジメントシステム，土木技術資料 38-1，38-43，1996.
- 3) 大島俊之，三上修一，山崎智之，丹波郁恵：橋梁健全度評価に用いる評価方法の検討と影響要因の解析，土木学会論文集，No.675/I-55，201-217，2001.
- 4) [www.city.yokohama.jp/me/douro/download/bessi\\_2.pdf](http://www.city.yokohama.jp/me/douro/download/bessi_2.pdf)
- 5) 土木学会鋼構造委員会：鋼橋における劣化現象と損傷の評価，丸善株，1996.

## 6. モニタリング技術の調査結果

### 6.1 高解像度デジタルカメラと赤外線カメラ（床版ひび割れ監視）

#### 6.1.1 概要と計測原理

赤外線サーモグラフィ法は、構造物の表面温度分布から欠陥を検知する方法である。これは、構造物中に存在する欠陥部（空隙、剥離、浮き等）が断熱層となり、日射や気温変化に起因して生ず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たものである。したがって、雨天や強風時など、悪天候下での撮影は困難となる。ただし、人工的な加熱を併用する場合には、気象条件の影響を受けない測定が可能である。また高解像度デジタルカメラでは、ひび割れの進展をデジタル画像として保存し、画像処理を行うことでひび割れ密度の算定や、データベースの構築などを行う手法である。



図 6.1 高解像度カメラ



図 6.2 サーモグラフィ

#### 6.1.2 応用例

法面の変状調査の例と、橋梁高欄のコンクリート剥離検知例を示す。



図 6.3 法面外観

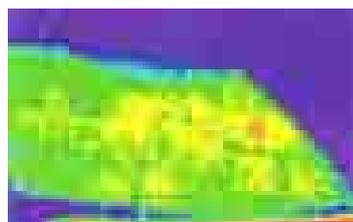


図 6.4 法面温度分布



図 6.5 高欄外観

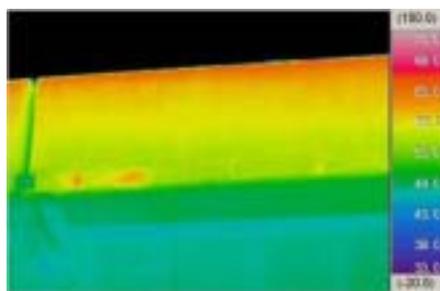


図 6.6 高欄温度分布

連絡先：(株)ソーキ，<http://www.sooki.co.jp/index.htm>

## 6.2 HVラインゲージ（変位計測）

### 6.2.1 概要と計測原理

橋梁の床版や主桁などの変位を、 $5\mu\text{m}$ の精度で簡単に計測するシステムである。計測原理は以下の通りである。まず橋脚や橋台等に2つの不動点を設け、この2点間に基準線を張る。この線を基準として帯状レーザーを用いて主桁等のたわみを測定する。投光器から発光された帯状レーザーは、基準線により一部がさえぎられ受光器側に影となり、その影をCCDが正確にとらえて計測する。構造物に変位が生じると影の位置が変化し、この変化量が変位（たわみ）となる。また図に示すように、水平・鉛直変位用の2つのセンサを用いているので、同時に水平・鉛直変位を測定することが可能である。

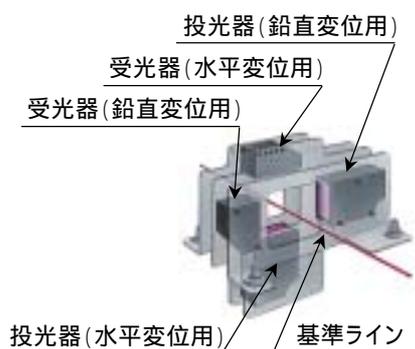


図 6.7 センサ詳細

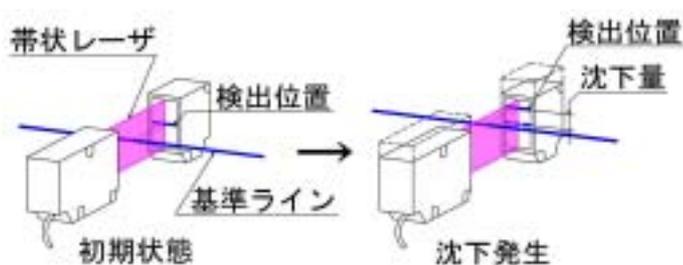


図 6.8 計測原理

### 6.2.2 応用例

計測手法として、HVラインゲージ方式と単管方式があり、前者は橋梁下部が河川などの障害物がある場合に有効な手法であり、後者は橋梁下部に障害物がなく不動点を設けることができる場合に効果的な手法である。

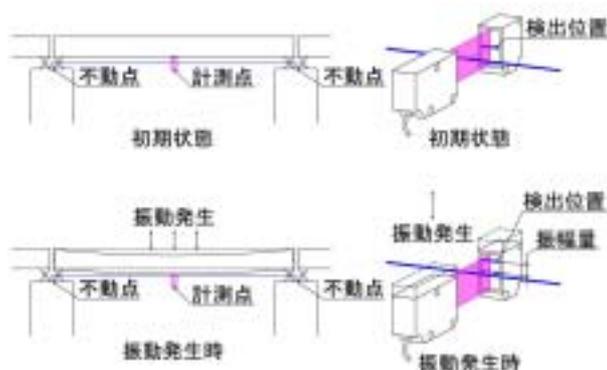


図 6.9 橋梁での適用例



図 6.10 HVラインゲージ

連絡先：計測技研株式会社，<http://www.keisokugiken.co.jp/>

### 6.3 FBG センサ (ひずみ計測)

#### 6.3.1 概要と計測原理

光ファイバそのものを受感部とする光ファイバセンサの一つで、 $4\mu$ 程度の精度によりひずみ計測が行える技術である。FBG センサは、光ファイバのコア部に屈折率が変化する部分(Bragg Grating)を設け、そこで反射する光信号の変化からひずみを計測する技術である。特徴としては、動的計測が可能なこと、一線で最大 12 点程度の計測点を設定することができること、長距離の伝送が可能であること、電磁波の影響を受けにくいことなどが挙げられる。

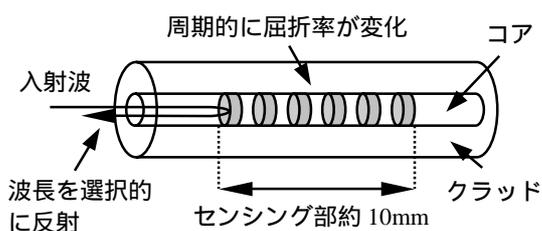


図6.11 FBGセンサの概要

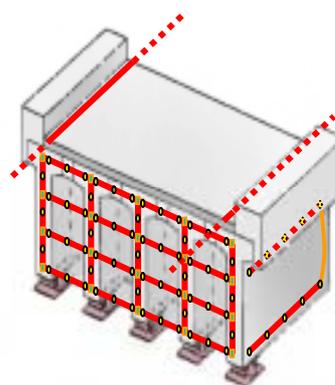


図 6.12 多点計測の例

#### 6.3.2 応用例

ロックネットワイヤー、袋ネット支持ワイヤー等に設置した光センサで岩盤の挙動や、落石を検知する。防災分野の他にもトンネル、橋梁などのモニタリングシステムへの適用が行われている。

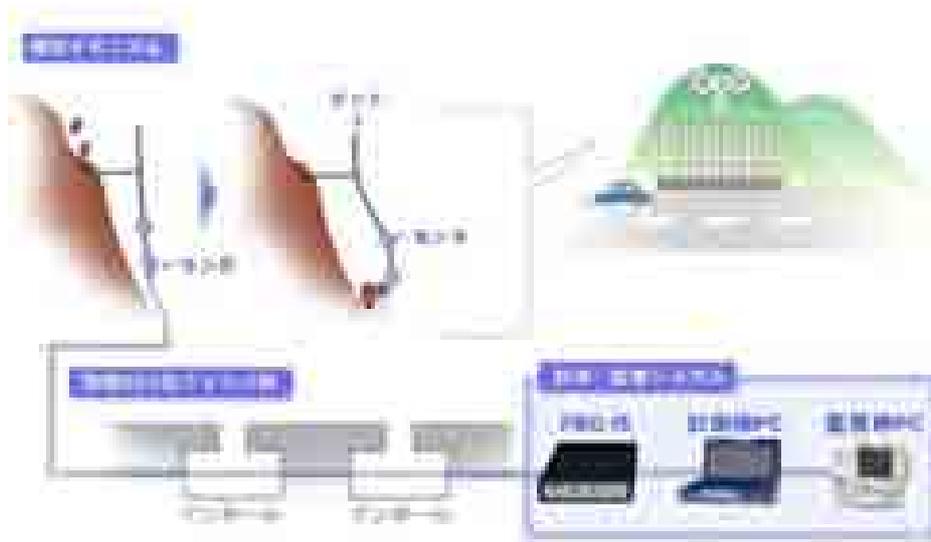


図6.13 防災分野への適用例

連絡先：NTT インフラネット，<http://www.nttinf.co.jp/>

## 6.4 OSMOS (2点間変位・ひずみ計測)

### 6.4.1 概要と計測原理

光学ストランドによる構造物のモニタリングシステム (OSMOS : Optical Strand Monitoring System, NETIS 登録番号 KT-000059) は, 光ファイバをセンサとして用い, 2点間の相対変位を高精度に静的あるいは動的に測定する方法である。測定には, 光ファイバの曲がり部において赤外線が漏洩し, 通過する光の強度が低下する「マイクロベンディングの原理」を利用している。

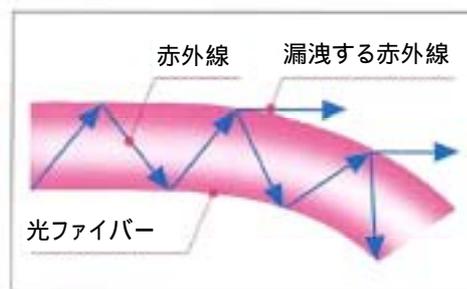


図 6.14 マイクロベンディングの原理

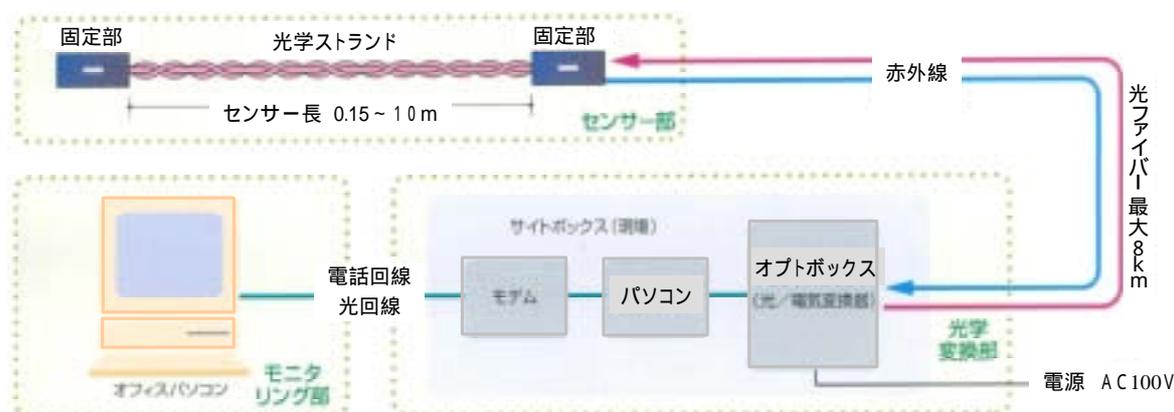


図 6.15 測定システムの概要

### 6.4.2 応用例

OSMOS は現在までに国内で 80 事例以上の構造物で適用実績がある。代表的な構造物には橋梁, トンネル, 斜面, 建築物などがあり, 橋梁では主桁, 床版, 橋脚, 支承部やトラス部材等の静的挙動ばかりでなく, 通行車両による動的挙動モニタリングの事例が多い。センサの両端を固定するだけで 2 点間の相対変位が得られるため, 設置位置を変えるだけで多様な使い方が可能である。

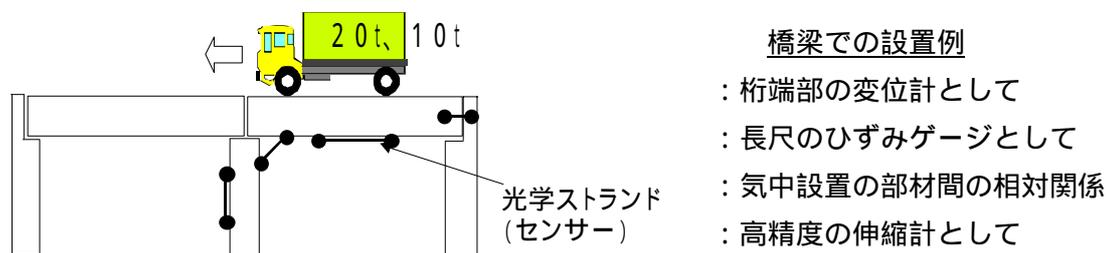


図 6.16 橋梁における OSMOS の設置例

連絡先： (株) 間 組 <http://www.hazama.co.jp/newtech/tech/osmos.html>  
 (株) 宮地鐵工所 <http://www.miyaji-iron.com/technology/skill/skill01.htm>  
 大日本コンクリート (株) <http://www.ne-con.co.jp/>

## 6.5 光ファイバシート（床版ひずみ計測）

### 6.5.1 概要と計測原理

一本の光ファイバをつづら織り状に配列し、非常に薄い不織布にはさみこんだもの。このシートを、梁、床版、柱などにエポキシ樹脂で接着することにより、面的なひずみ分布が得られる。計測原理として B-OTDR センサを用いており、パルス波を光ファイバ内に照射させたときに発生するブリルアン散乱光の波長シフト量と到達時間で位置とひずみの大きさを特定する。測定精度は 100~200 $\mu$ 程度で、10cm $\times$ 10cm 程度のメッシュを 1 単位とする面的なひずみ分布が得られる。また 1m $\times$ 3m程度を 1 枚として施工を行う。図にファイバシートの例と、製作工程を示す。



図 6.17 光ファイバシート



図 6.18 不織布の接着

### 6.5.2 応用例

床版での実施例を示す。

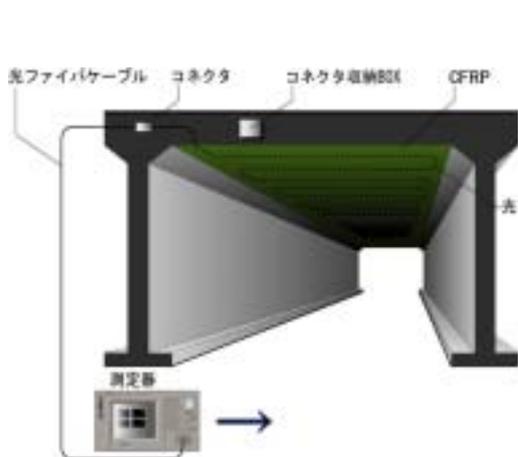


図 6.19 橋梁床版での設置例

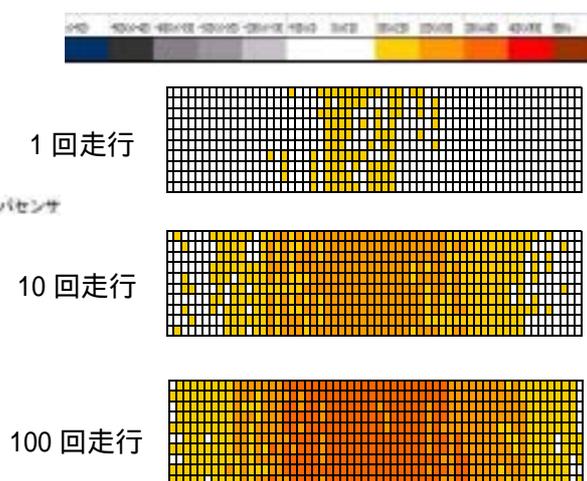


図 6.20 ひずみ発生分布の推移

連絡先： ショ・ボンド<sup>®</sup> 建設株, <http://www.sho-bond.co.jp/index.html>

## 6.7 オーリス（非破壊検査システム）

### 6.7.1 概要と計測原理

本システムは、主にコンクリート構造物を対象としてその構造物あるいは介在する構造物の表面を打撃し、その内部の亀裂面で反射した反射波の高周波数成分（0.2kHz～1000kHz）を抽出し読み取ることによって、コンクリート構造物内部の亀裂位置を探知する。また本システムは発振（トリガー）に従来衝撃弾性波法と同じ衝撃波を用いるが、高周波数成分をより多く発生するために高硬度の鋼製ハンマーを使用する。また、受振（受振子）に共振周波数が高周波数範囲にある圧電センサを用い、センサの共振特性を生かし特定範囲の高周波数成分の受振を図る。さらに入力した波形に帯域フィルターをかけることにより、亀裂で最も卓越に反射する特定周波数範囲の高周波数成分の反射波を選択し取り出し、反射波の走行時間をもとに亀裂位置を求めている。



図 6.21 オーリス一式

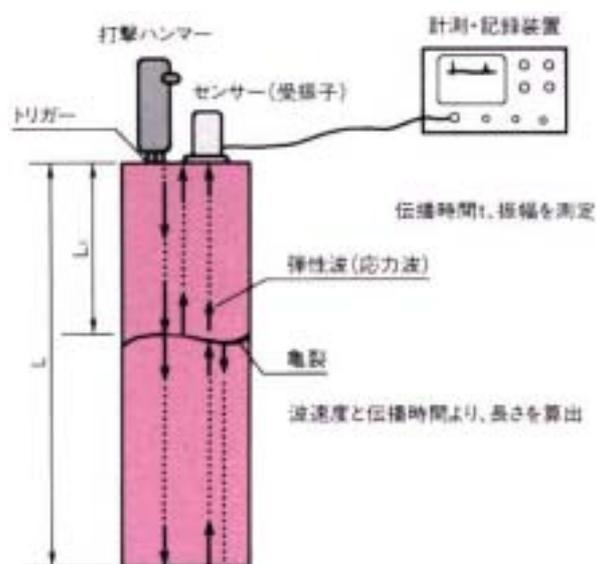


図 6.22 計測原理

### 6.7.2 応用例

橋梁ケーソン基礎の損傷探査実施例を図に示す。



図 6.23 対象ケーソン基礎

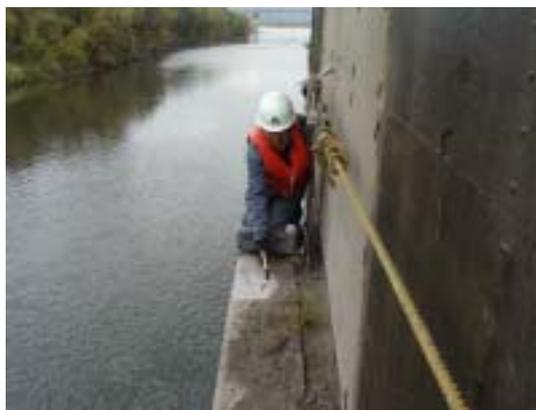


図 6.24 検査状況

連絡先： 青木あすなる建設株式会社, <http://www.aconst.co.jp/technical/jiban/jiban1.html>

## 7. 補修技術の調査結果

### 7.1 浸透性吸水防止材「マジカルリペラー」

- ・ コンクリート表層部にシリコン樹脂の吸水防止層を形成することにより、水分や塩化物イオンの浸入を防止する技術。塩害、凍害、アルカリ骨材反応などの進行を遅らせる
- ・ シリコン樹脂はコンクリートと強固に結合するため、吸水防止層は剥離などを生じない
- ・ コンクリートの細孔を塞がないため、内部の水分を水蒸気として排出できる



図 7.1 材料の外観

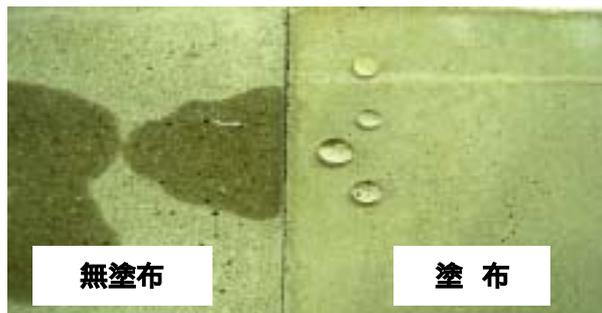


図 7.2 吸水防止効果

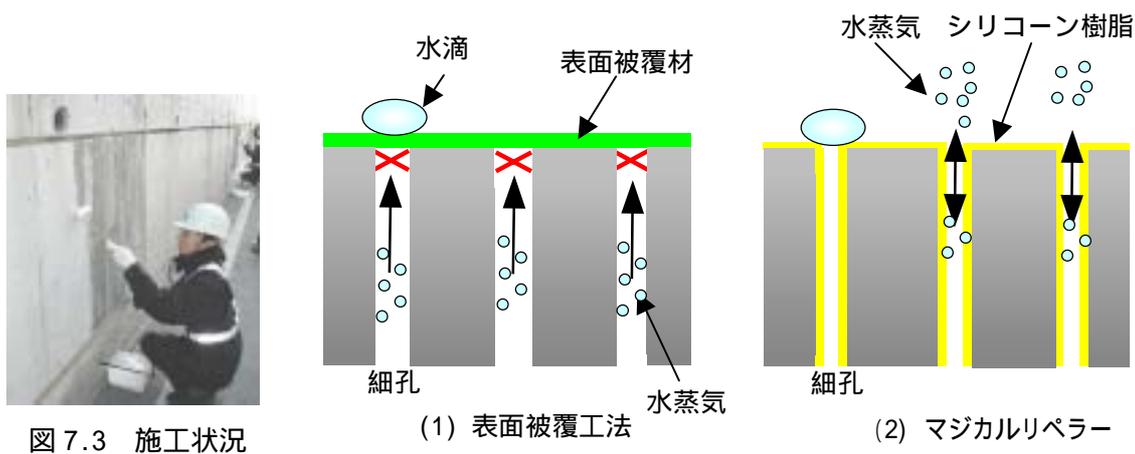


図 7.3 施工状況

図 7.4 表面被覆工法との比較



図 7.5 塩水噴霧による促進試験

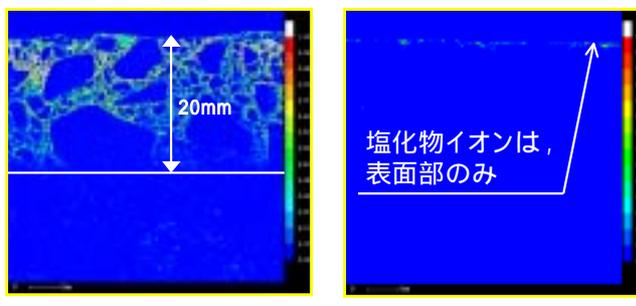


図 7.6 塩化物イオン浸透量の比較

連絡先： 鹿島建設（株） <http://www.kajima.co.jp/news/press/200007/12c1fo-j.htm>

## 7.2 含浸性表面改質材「コロイダルシリカ」

- ・ 超微粒子コロイダルシリカを噴射・浸透させることにより、非結晶ゲルを生成して、毛細管空隙やゲル空隙を充填して組織の緻密化をはかる技術
- ・ コンクリート内部の保護強化とバリア効果により、透水性や透気性が小さくなる、凍害・中性化に対する抵抗性が向上するなどの効果が期待できる
- ・ 予防保全対策として使用することによって、コンクリート構造物の延命化をはかることができる

空隙・気孔の種類	1 nm	10 nm	10 <sup>2</sup> nm	1 μm	10 μm	10 <sup>2</sup> μm	1 mm	10 mm
イントラポア (巻込み空気)								←
インレイトア (連行空気)					↔			
毛細管空隙				↔				
ゲル空隙	↔							

コロイダルシリカ平均径

図 7.7 コンクリート中の空隙・気孔の大きさ



図 7.8 噴射施工状況

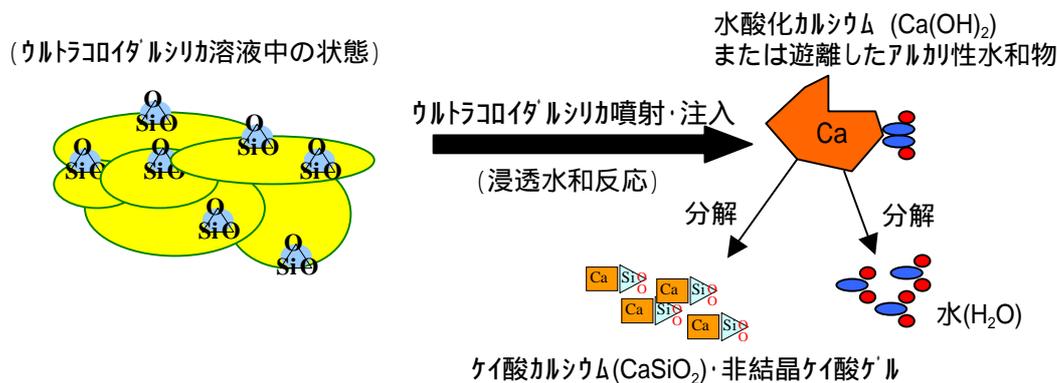


図 7.9 超微粒子コロイダルシリカの反応メカニズム

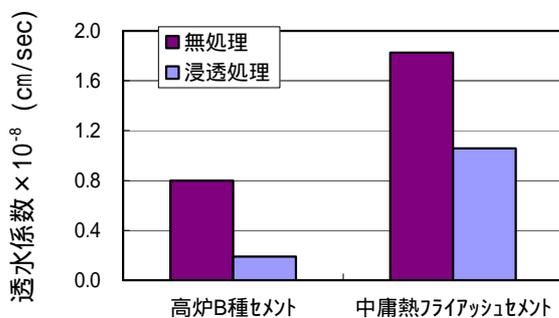


図 7.10 耐透水性の改善効果例 (室内実験による)

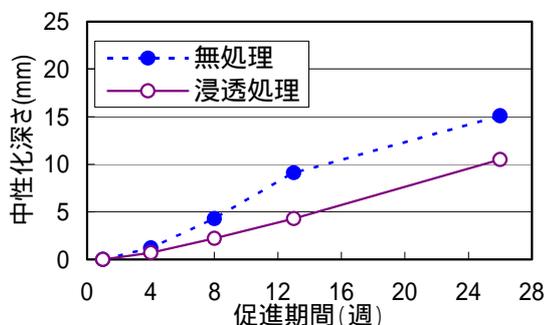


図 7.11 中性化抵抗性の改善効果例 (促進試験による)

連絡先: 佐藤工業(株) <http://www.satokogyo.co.jp/>

### 7.3 湿式吹付け工法「ジョツツ・クリート工法」

- ・ 最大厚さ 100mm 程度までの断面修復が連続的に施工でき、工期短縮が可能
- ・ かぶり部分には補強繊維を混合して吹き付けるため、剥落に対して高い抵抗性を有する
- ・ 乾式吹付け工法に比べて低粉塵・低リバウンドである



図 7.12 施工状況

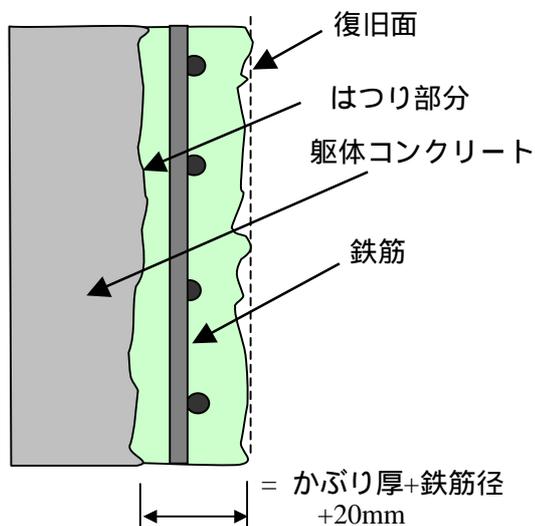


図 7.13 断面修復の概要

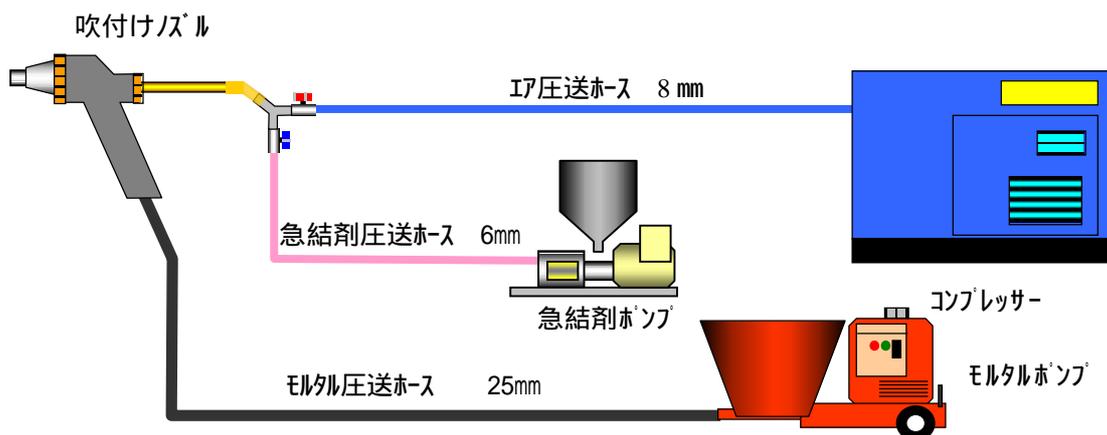


図 7.14 吹付けシステム

試験結果例（公的試験機関による(財)ベターリビング）

試験項目	試験結果	準拠基準
曲げ強さ, 圧縮強さ	9.4 N/mm <sup>2</sup> , 54.8N/mm <sup>2</sup>	JIS A 1171:2000 7.2
付着強さ	2.8 N/mm <sup>2</sup>	JIS A 1171:2000 7.3
吸水量	16.1g	JIS A 1171:2000 7.4
透水量	0.2ml/h	JIS A 6916:2000 7.15
長さ変化	0.064%	JIS A 1171:2000 7.6
熱膨張係数	0.125 × 10 <sup>-4</sup> /	JCI 試験案(14)
中性化深さ	0mm	JIS A 1171:2000 7.7
塩化物イオン浸透深さ	0mm	JIS A 1171:2000 7.8
凍結融解抵抗性*	300 サイクル異常なし	JIS A 1171:2000 7.10

・ 試験体は型枠に流し込んで作製      \* : 室内試験結果

連絡先： 東急建設（株）      <http://const.tokyu.com/>

#### 7.4 床版取替工法「クイック・チェンジ工法」

- ・ 疲労損傷したRC床版を、高品質なサンドイッチ型複合床版へ、素早く取り替える技術
- ・ 工場製造したデッキプレート・形鋼・底鋼板から構成される鋼殻床版パネルを、既設床版撤去後の桁上に敷設し、パネル同士および桁間との連結を行った後、軽量高流動コンクリートを充てん打設することにより施工
- ・ 床版重量が軽く、かつ床版パネルの上下鋼板が主桁補強として作用
- ・ コンクリートが鋼板に覆われているため、コンクリートに対する劣化因子の進入がなく、また、はく落等の第三者被害が発生することがない
- ・ 従来工法（PCa床版）と比較し大幅な工期短縮

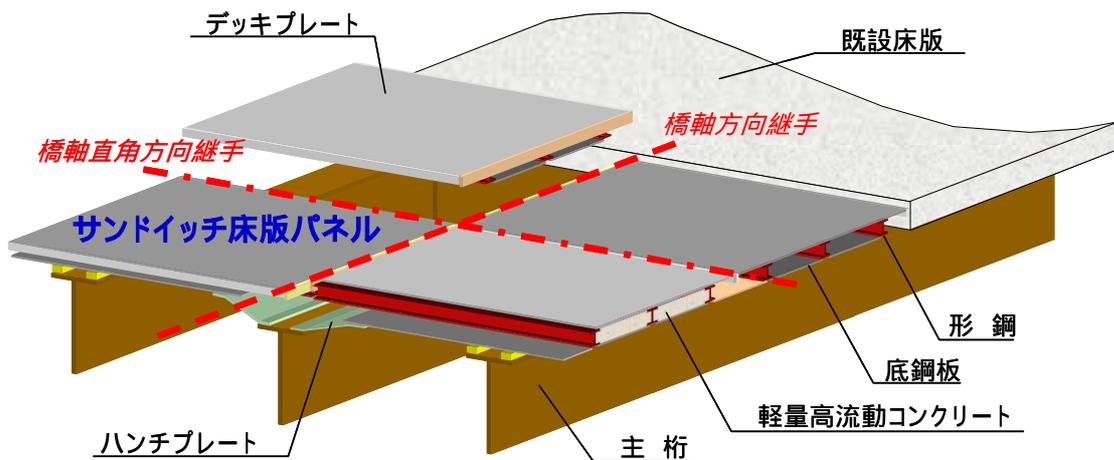


図 7.15 構造概要

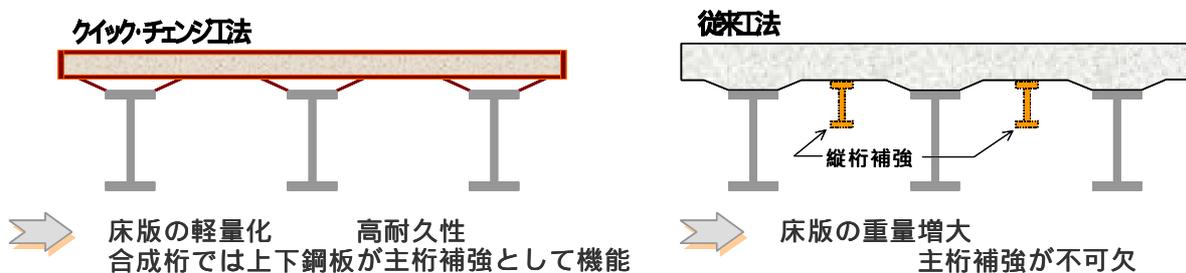
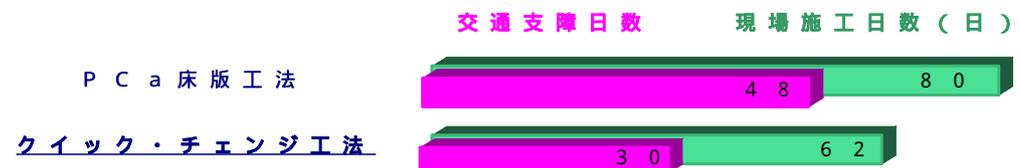


図 7.16 主桁補強効果



< 試算条件 >

- ・ 橋長 80 m × 有効幅員 8 m の非合成桁橋
- ・ 施工条件 ; 昼間全面交通開放、夜間片側交互通行 ( 20:00 ~ 6:00 )

図 7.17 施工日数の比較

連絡先： (株) 鴻池組 <http://www.konoike.co.jp/tec/gd-quick.html>

### 7.5 疲労き裂部分の供用下における溶接判定技術

供用下の溶接作業は、ルートギャップ開口変位が変動し、作業足場が変動する問題がある。そのため溶接棒が乱れてアークが不安定となり、通常の溶接では発生しない凝固割れや高温固相われなどの高温われによる溶接欠陥の発生が懸念される。よって当技術では、交通荷重で振動している橋梁の溶接補修が出来るかどうかを判定して品質の確かな補修を行う。

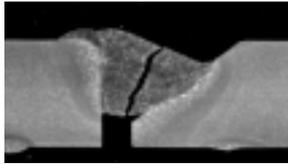


図 7.18 溶接割れの一例

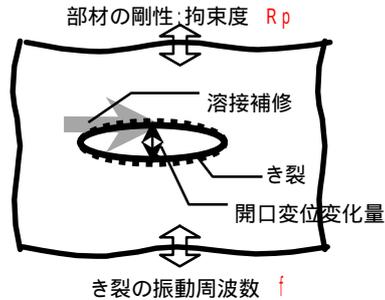


図 7.19 振動下のき裂の補修概念図



図 7.20 現場を模擬した溶接試験

- ・ 交通規制無しに亀裂が振動する状態で溶接補修することが出来る
- ・ 最新の計測手法により非接触で計測、同時に判定、溶接施工を実施する
- ・ 振動下の溶接補修判定のデータベースを活用してどのような現場でも技術評価ができる。

疲労き裂および損傷部分の開口変位量と橋桁の振動数を計測し、さらにき裂部の拘束度を把握して高温割れが発生しないかどうかを判定する。その評価によって溶接条件や拘束条件を決定する。

## 8. 実橋におけるモニタリング結果

### 8.1 モニタリング概要

#### 8.1.1 U橋の概要

U橋は、昭和35年（1960年）に建設された7径間ゲルバー鋼板桁橋であり、現在、床板、および橋桁端部の疲労が問題となっている。また、国道2号線は大型車の通行量が比較的多いことから、今後もこれらの疲労損傷が進展する可能性は高い。橋梁の諸元を表8.1に、外観を図8.1～図8.8に示す。U橋は平成16年度2月に床版の上面増厚補強を行っており、増厚前後の様子を図8.9および図8.10に示す。またU橋の平面図を図8.11、側面図を図8.12に示す。また橋軸方向の断面図を図8.13に示す。

表 8.1 U橋諸元

建設年月		昭和35年（1960年）3月	
橋長		L = 187.00m	
支間長	吊桁	L = 16.00m	
	定着桁	L = 6.2m + 28.4m + 6.2m	
有効幅員		W = 8.00m	
構造形式	上部構造	7径間ゲルバー鋼板桁橋（吊桁部は合成桁）	
	下部構造	橋台	壁式橋台
		橋脚	小判型壁式橋脚
基礎構造		ケーソン基礎	
橋格		1等級（TL-20）	
適用示方書		昭和31年鋼道路橋示方書	
増厚前	床版厚さ	170mm	
増厚後	床版厚さ	220mm	



図 8.1 概観(1)



図 8.2 概観(2)



図 8.3 概観(3)



図 8.4 概観(4)



図 8.5 床組



図 8.6 P6 橋脚付近



図 8.7 床版



図 8.8 ヒンジ部



図 8.9 増厚前伸縮部



図 8.10 南側増厚後伸縮部

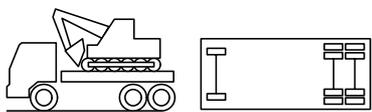




### 8.1.2 モニタリングの目的

疲労損傷を生じている U 橋に対し、作用荷重の評価および補強効果の確認、さらには性能評価への情報提供のためにモニタリングを行っている。ただし補強効果に関しては平成 16 年 2 月に実施したモニタリング結果を用いる。また平成 16 年 7 月および 9 月に重量が既知の基準車両を走行させ、性能評価の基準とした。ただし計測時に交通規制などは行っておらず、一般車両の交通量が少ない時に基準車両を走行させ計測を行った。表 8.2 に基準車両を示す。

表 8.2 基準車両

種類	重量				概要図
	第一軸	第二軸	第三軸	総重量	
セルフローダー (12t バックホー積載)	7.7t	8.9t	8.7t	25.4t	

### 8.1.3 計測項目とセンサ配置

表 8.3 に計測項目一覧を示す。また 7 月 23 日に実施したモニタリングでのセンサの配置を図 8.13 に示す。このときの各種計器の設置状況を図 8.14～図 8.21 に示す。各センサの詳細は、第 6 章「モニタリング技術の調査結果」を参照のこと。

表 8.3 計測項目一覧

項目	センサ	設置場所	数量
床版ひび割れ	デジタルカメラ	桁下より撮影 当日撤去	1
	赤外線カメラ		
鋼材亀裂	CCD カメラ	桁端部	1
桁の変位	HV ラインゲージ	桁中央部	1
桁端部の衝撃応答	加速度計	桁端部	8
桁のひずみ	電気式ひずみゲージ	桁部	12
	FBG センサ		10
	OSMOS		6
床版のひずみ	OSMOS	床版	4
	光ファイバシート	床版 (H16 . 11 以降)	2 枚
桁の温度	熱電対	桁部	8





図 8.14 赤外線カメラ撮影状況



図 8.15 計測機器 (FBG, ひずみゲージ)



図 8.16 HV ラインゲージ



図 8.17 HV ラインゲージ

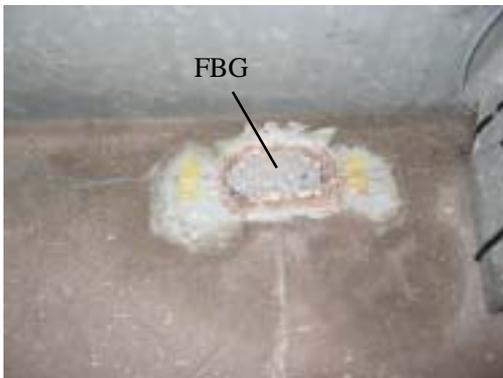


図 8.18 FBG センサ

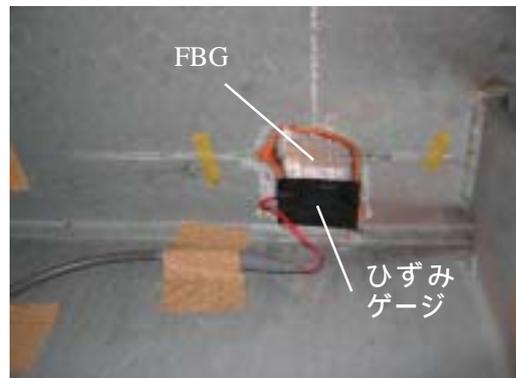


図 8.19 FBG センサとひずみゲージ

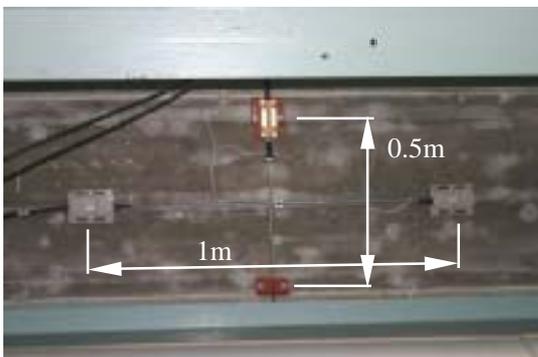


図 8.20 床版下 OSMOS

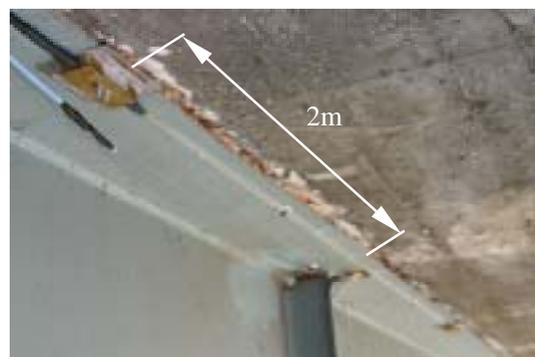


図 8.21 フランジ上 OSMOS

## 8.2 実施結果

### 8.2.1 交通量調査結果

7月23日,9月3日の両計測日において大型車の交通量を調査した。交通量は上下車線及び車軸数で分類して調査を行った。なお軽トラックは大型車に含めていない。7月22,23日の調査では,時刻によって若干のばらつきはあるものの上下車線合わせて約50台/5分という結果が得られた。9月3日の調査でも300台/30分という結果が得られたので,概算で600台/時,年間に換算すると518万4千台の大型車が橋上を通過していると考えられる。また車軸数で分類すると2軸,3軸の大型車が圧倒的に多い。また過去の調査で得られた大型車交通量を以下に示す(表8.4)。現在でも一時間に500台以上の大型車が通過している。

表 8.4 交通量調査結果

調査時期	大型車交通量(台/時)
H16	600
H11	520
H9	388

### 8.2.2 部材応答の影響線

U橋を一次元梁とみなした場合の,各部材応答の影響線図を図8.22に示す。ゲルバー構造のため,定着桁応答の影響範囲が大きいことが分かる。すなわち定着桁区間では,同時載荷の影響を受けやすい構造となっているといえる。

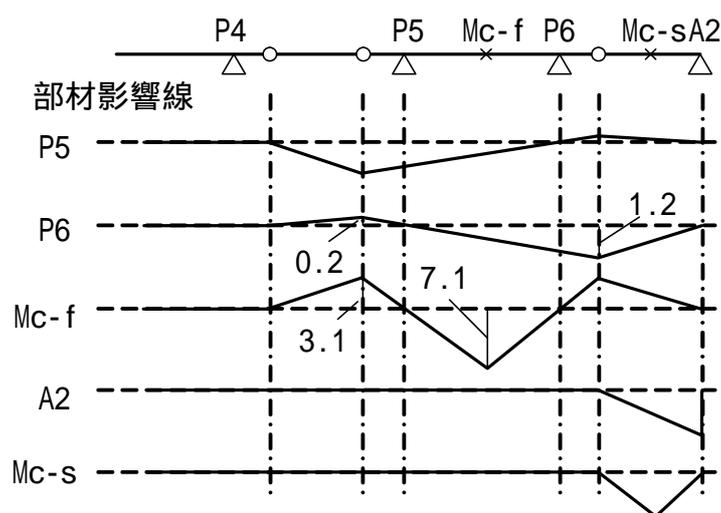


図 8.22 各部材の影響線形状

### 8.2.3 主桁下フランジの応力頻度評価

平成 16 年月上旬における，補強前後の定着桁主桁下フランジの応力頻度結果を示す．計測は両日ともに平日の 12 時 40 分から約 80 分行っている．図 8.23 に G1 桁下フランジ，図 8.24 に G4 桁下フランジの結果を示す．特に頻度の大きい応力範囲で，補修により頻度が低減していることがわかる．よって床版増厚により床版の荷重分配効果が向上し，主桁の発生応力が低減したといえる．

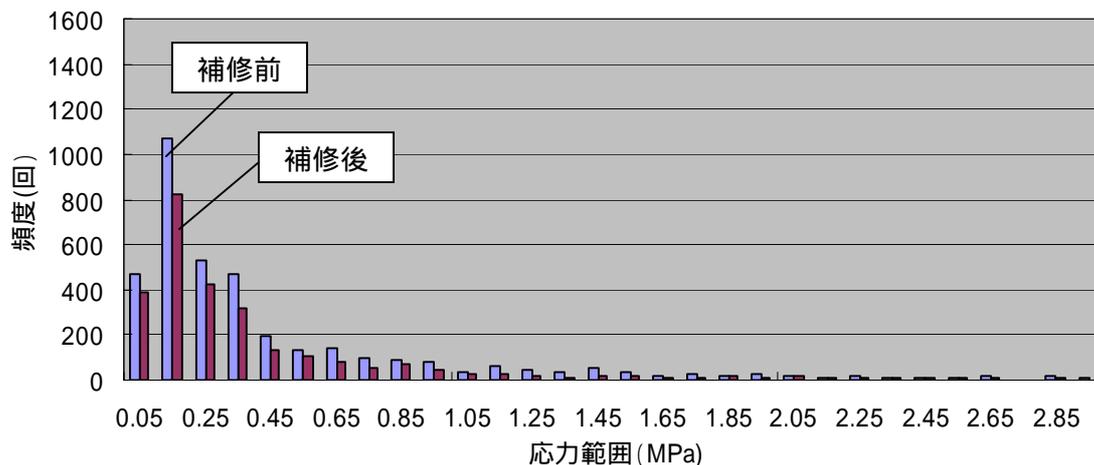


図 8.23 G1 桁下フランジでの応力頻度

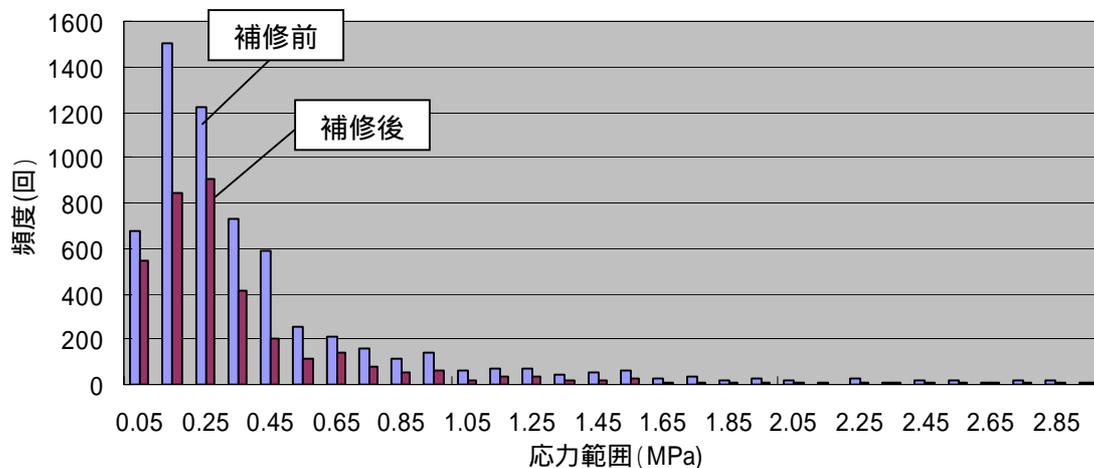


図 8.24 G4 桁下フランジでの応力頻度

### 8.2.4 主桁のたわみと主桁フランジのひずみの整合性

各種機器により計測された主桁フランジのひずみを比較する．また理論上，中立軸が一定であると仮定すれば曲げひずみはたわみと比例関係にあるので，主桁の変位も同様に比較する．図 8.25 は時速 50km，図 8.26 は時速 30km での定着桁 G1 フランジの曲げひずみ（上フランジと下フランジのひずみの差）と，定着桁 G1 中央でのたわみを示す．各種計測機器により得られ

たひずみ履歴は、多少の開きはあるがほぼ一致することがわかる。またたわみに関しては、境界条件や合成条件により変化するため、若干の差が生じてはいるものの、ひずみ応答と相関性が確認できる。これより、各計器が正確に現象を捉えていることがわかる。また各種計器により得られたひずみを用いて、たわみを推定できる可能性があるといえる。

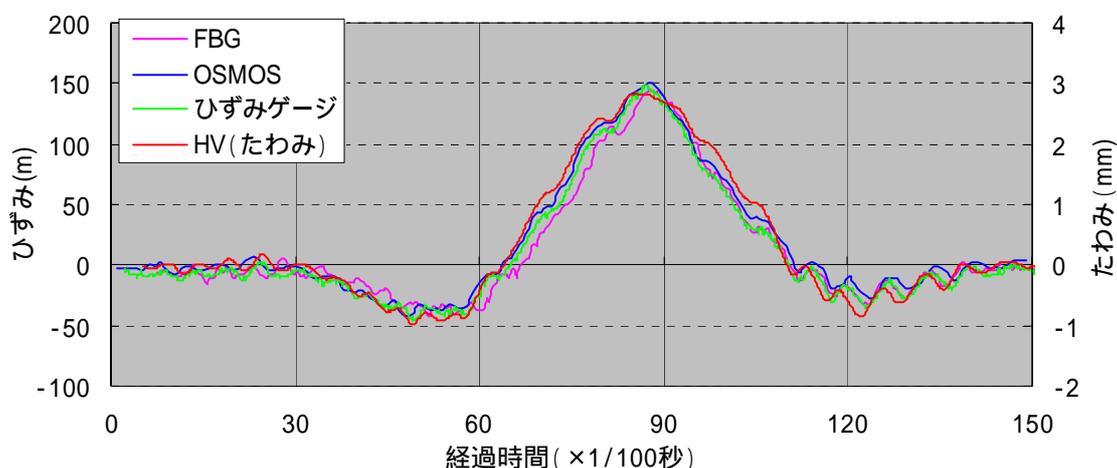


図 8.25 基準車両（時速 50km）通過時の主桁曲げひずみ応答とたわみ応答

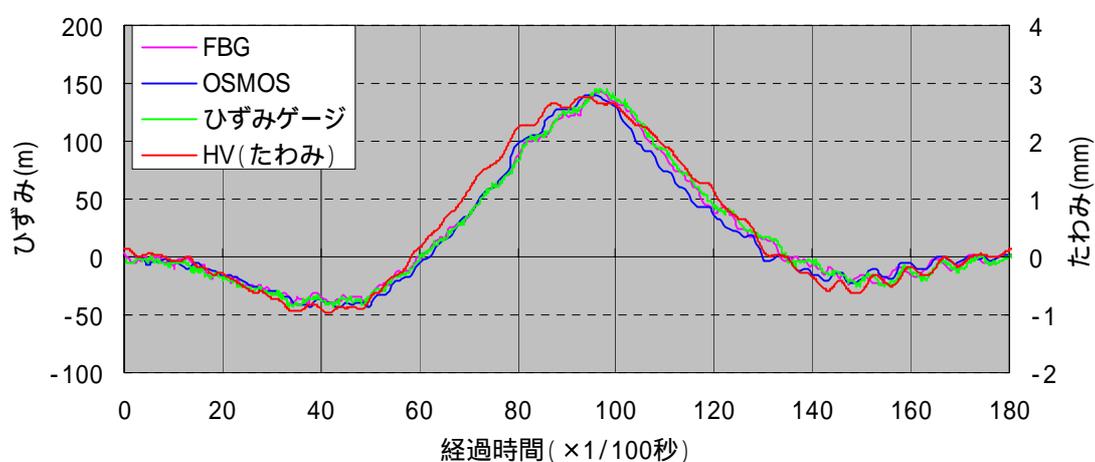


図 8.26 基準車両（時速 30km）通過時の主桁曲げひずみ応答とたわみ応答

### 8.2.5 主桁下フランジひずみによる荷重分配の検討

定着桁中央と吊桁中央の下フランジに発生するひずみを用いて、荷重分配機能の検討を行う。ひずみの値は基準車両走行時の最大応答値を用いた。図 8.27 に、定着桁（非合成桁）における各主桁下フランジに発生するひずみを OSMOS により計測した結果を示す。また図 8.28 に、吊桁（合成桁）における各主桁下フランジに発生するひずみをひずみゲージにより計測した結果を示す。図より、定着桁では上下線ともに荷重が線形に分配されている。しかし、吊桁では

下り車線で荷重作用下の桁に発生するひずみが大きく、また荷重が作用していない側の桁に発生するひずみが比較的小さいため、床版の荷重分配機能や横構などの2次部材の機能が低下している可能性がある。

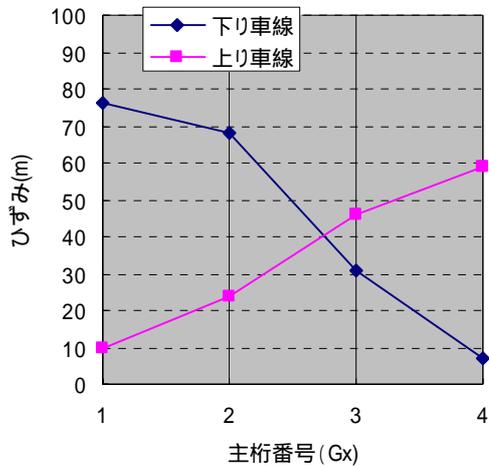


図 8.27 吊桁主桁下フランジの応答

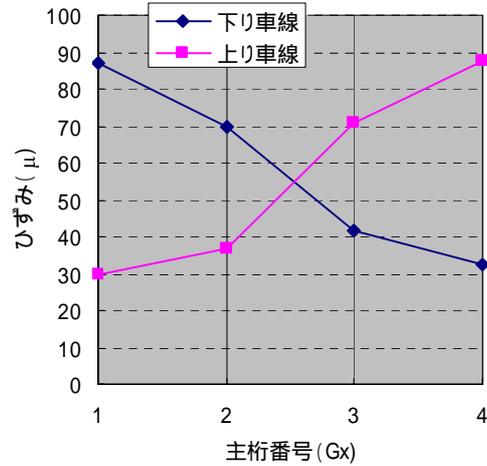


図 8.28 定着桁主桁下フランジの応答

### 8.2.6 端横桁における衝撃計測と荷重特性の評価

端横桁における衝撃加速度の測定結果を示す。結果は、上り車線に基準車両が進入した場合に発生する衝撃加速度である。図 8.29 には時速 50km での結果を、図 8.30 には時速 30km での結果を示す。これより同一荷重でも速度に応じて波形の大きさも異なることがわかる。また、それぞれの軸に対してスペクトル解析を行った結果を図 8.31 および図 8.32 に示す。これより第二軸、第三軸の応答波形は互いに相似であるが、第一軸の波形は二軸三軸とは異なることがわかる。これは車両のサスペンションなど車両振動に原因があると推測される。よって端部の衝撃波形を詳細に分析すれば、衝撃係数などの車両振動の影響を評価できる可能性があるため、今後検討を行っていく予定である。

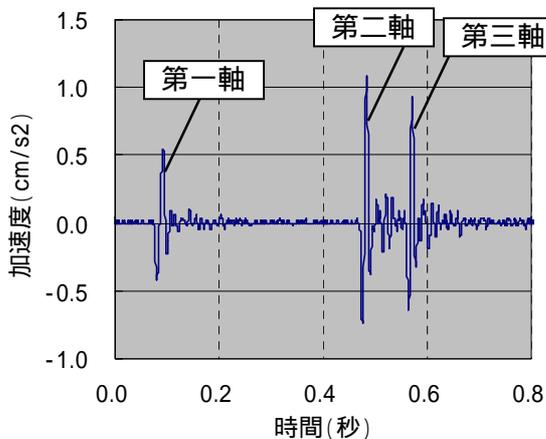


図 8.29 時速 50km での端部衝撃応答

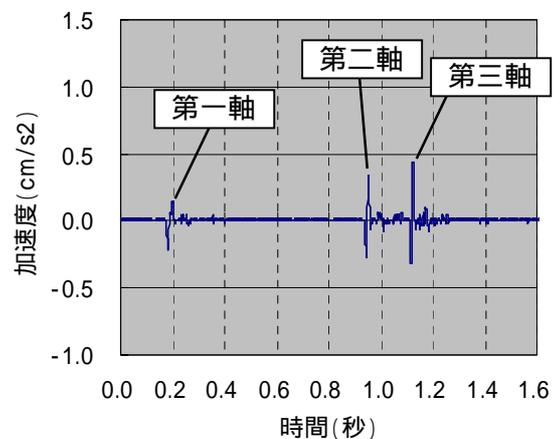


図 8.30 時速 30km での端部衝撃応答

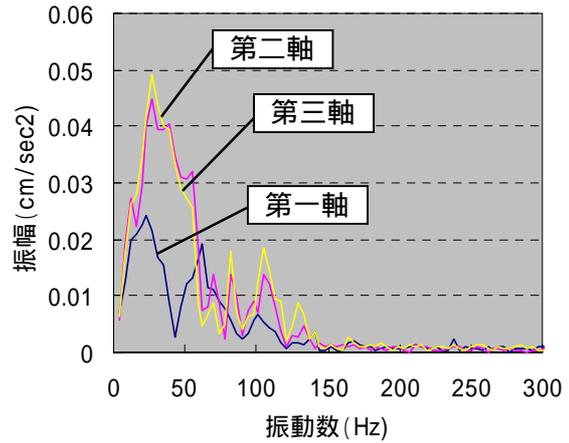
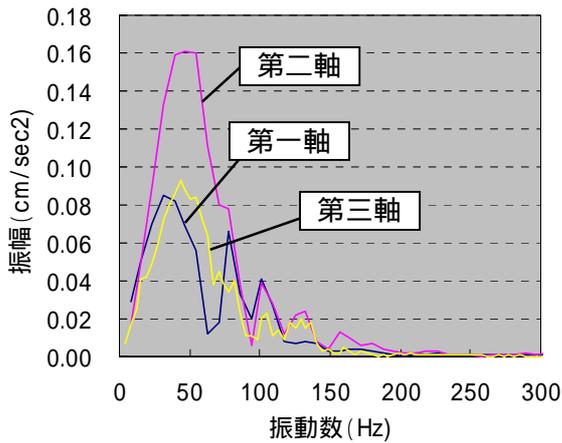


図 8.31 時速 50km での端部加速度スペクトル 図 8.32 時速 30km での端部加速度スペクトル

### 8.2.7 たわみと固有振動数による補強効果の確認

表 8.5 に補修前後での定着桁固有振動数の変化を示す。この値は、基準車両通過後の外桁フランジのたわみ履歴より求めた一次卓越振動数である。補修後の固有振動数が若干大きくなっていることより、補修により平均剛性が高くなったといえる。また床版増厚前後の G1 桁および G4 桁のたわみ形状を図 8.33 および図 8.34 に示す。補修前後ともに基準車両下り車線 (G1 桁上) 時速 50km 走行時の測定結果である。たわみの最大値が一割程度小さくなっていることがわかる。よって床版増厚により剛性が上昇し、たわみ量が小さくなったといえる。ただし、測定を行った定着桁は非合成桁であり、理論上床版増厚によりたわみが低減することはないが、定着桁が合成挙動をしているため、効果が現れたといえる。全体剛性が上がったことが確認できた。

表 8.5 補修前後における固有振動数変化

補強前	補強後
2.73 Hz	3.08 Hz

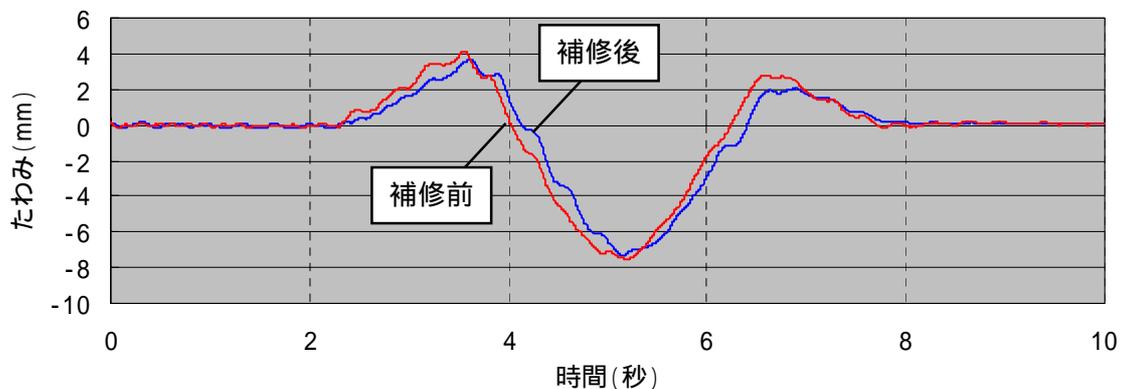


図 8.33 補修前後における G1 桁上のたわみ

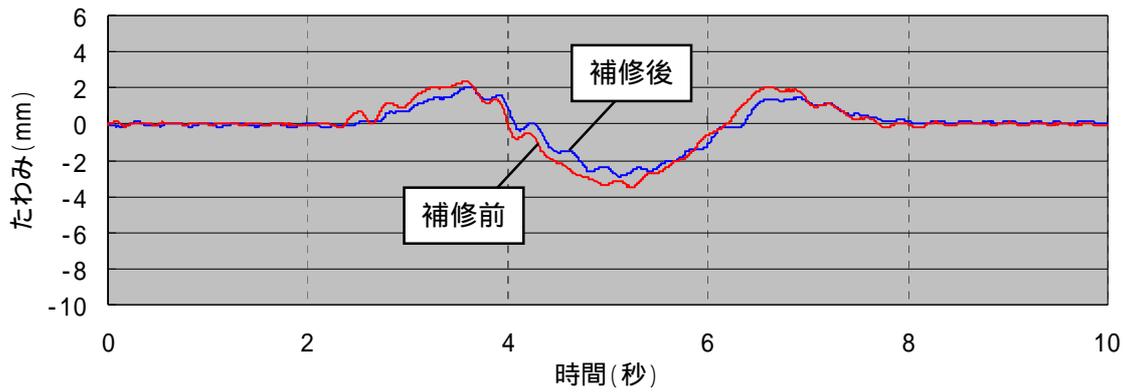


図 8.30 補修前後における G4 桁上のたわみ

### 8.2.8 床版のひび割れ監視

高解像度のデジタルカメラを用いてひび割れ密度の測定を行った。図 8.31 のように画面上でひび割れ長を集計することが可能であり、ひび割れ履歴などのデータベースの構築が可能である。同一区画での赤外線カメラの画像を図 8.32 に示す。青色部に表層付近の漏水、赤色部にコンクリートの剥離の可能性が指摘できる。

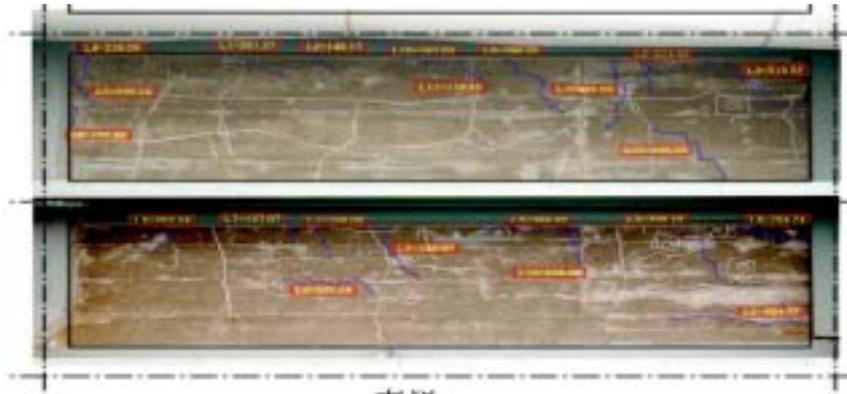


図 8.31 デジタルカメラによる管理

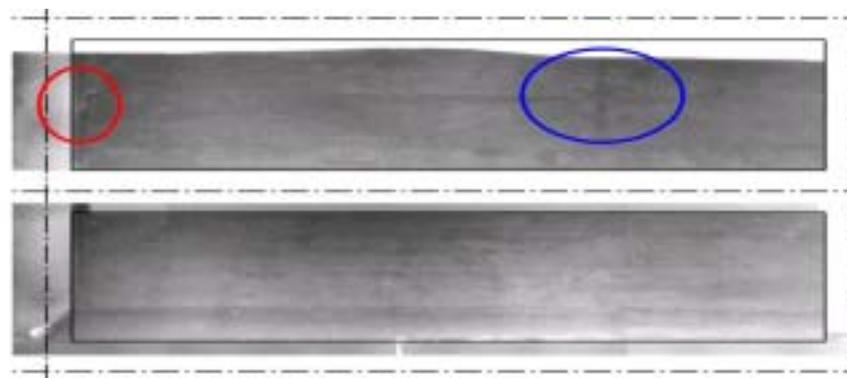


図 8.32 赤外線による剥離検知

## 9. 塩害損傷を受ける実橋に対する補修補強技術

### 9.1 塩害の実態

#### 9.1.1 S橋の概要

S橋は昭和38年に供用開始された6径間PC単純桁橋である。建設後40年以上が経過していること、使用環境が河口付近であることから、塩害劣化の進行が懸念されている。過去の点検台帳によると、上部工ではコンクリート剥離や鉄筋露出の記録があるものの、現状では劣化部分の補修と表面被覆工による塩害対策がとられている。また、下部工は耐震補強が行われているものの、塩害対策は実施されていない。橋梁諸元を表9.1に、一般図を図9.1に、外観を図9.2～9.3に示す。

表 9.1 橋梁諸元

建設年月	昭和38年(1963年)3月	
橋長	153.00m	
支間長	6 @ 25.460m	
有効幅員	7.00m	
構造形式	上部構造	6径間PC単純桁橋
	下部構造	重力式橋台、壁式橋脚
	基礎構造	ケーソン基礎(一部木杭)
橋格	一等橋(TL-20)	
適用示方書	昭和31年	

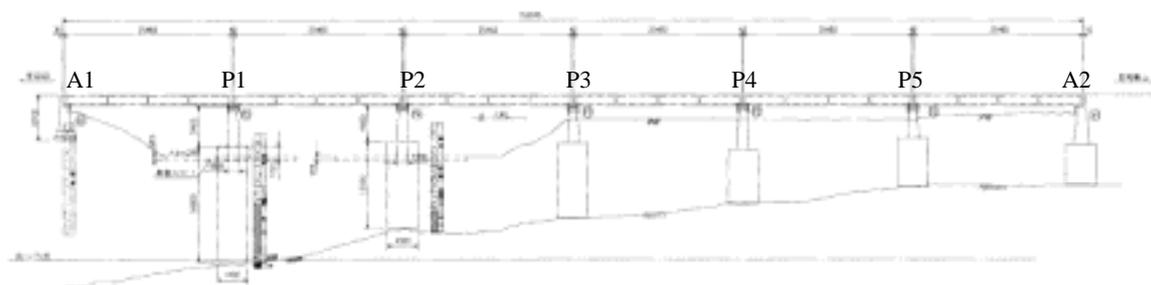


図 9.1 橋梁一般図



図 9.2 外観(1)



図 9.3 外観(2)

### 9.1.2 外観目視による実態調査

直近の点検調書（2002年1月）によると、上部工の数箇所にコンクリート剥離と鉄筋露出が報告されているが、現状ではすべて補修済であった。ただし、外観目視によると点検調書に記載されていない表面塗膜のひび割れ、錆汁の滲出、床版継目からのエフロレッセンスなど軽微な損傷が数箇所確認され、補修後にも塩害が進行している可能性が示された。



図 9.4 表面塗膜のひび割れの一例



図 9.5 錆汁滲出の一例

下部工（橋脚）にも一部コンクリート剥離および鉄筋露出が認められた。また、施工時の型枠セパレータの処理に不備があり、セパレータの腐食も確認された。



図 9.6 剥離・鉄筋露出の一例



図 9.7 セパレータの腐食

## 9.2 補修計画

### 9.2.1 塩害に対する予防保全

下部工を対象に、塩害劣化の進行を遅らせるための予防保全対策を実施する。実施内容のフローを図 9.8 に、効果のイメージを図 9.9 に示す。

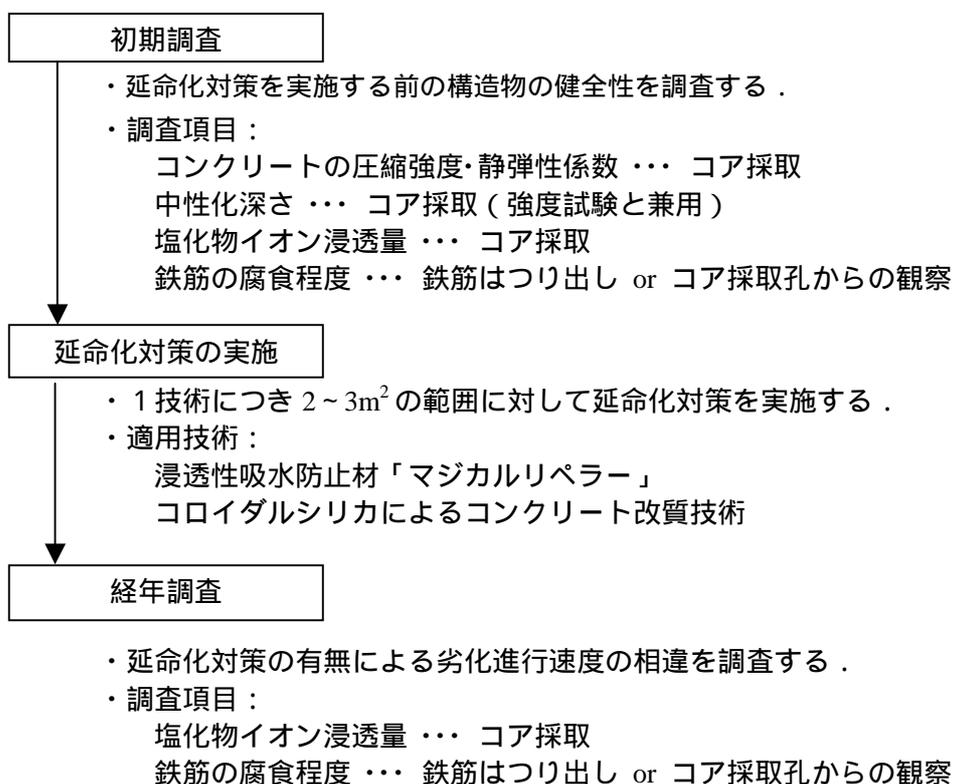


図 9.8 予防保全対策の実施フロー

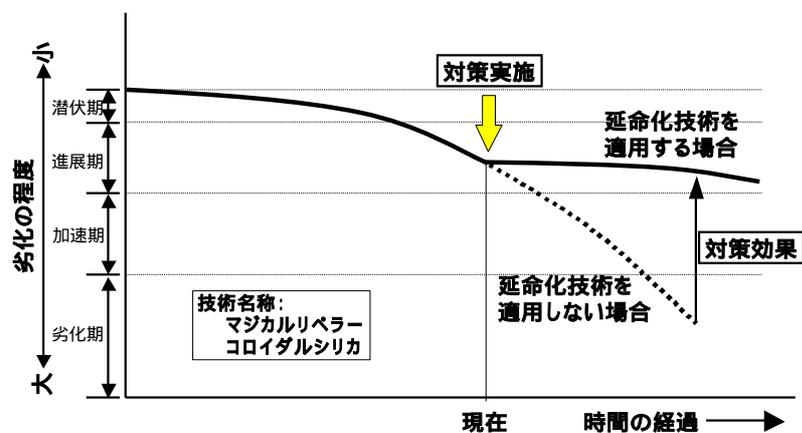


図 9.9 予防保全対策の効果のイメージ

### 9.2.2 塩害による損傷部の断面補修

下部工を対象に、塩害劣化により断面欠損または鉄筋露出している部分の断面修復を実施する。実施内容のフローを図9.10に、効果のイメージを図9.11に示す。

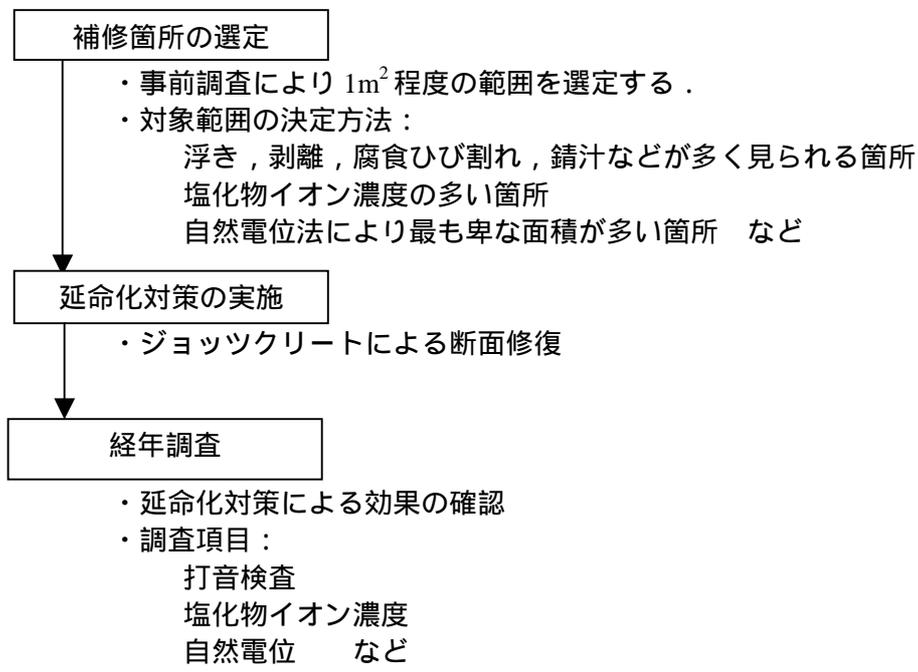


図 9.10 断面修復の実施フロー

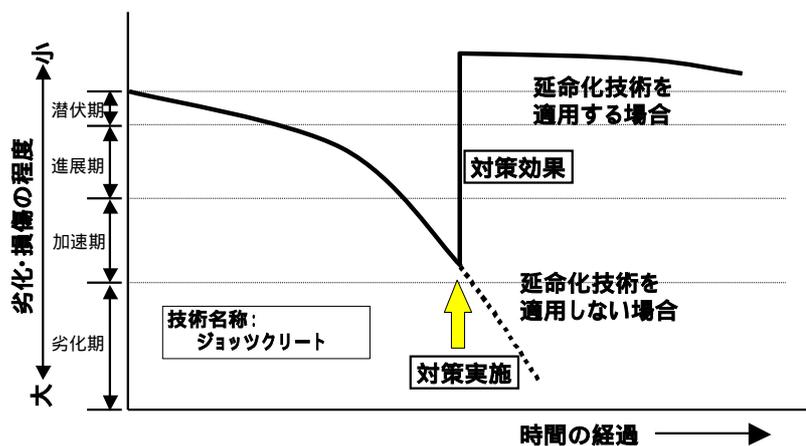


図 9.9 予防保全対策の効果のイメージ