平成 18 年度

既設構造物の延命化技術に関する研究

報告書

平成 19 年 2 月

既設構造物の延命化技術に関する研究プロジェクトチーム

はじめに

安心安全で，豊かな社会生活と産業活動を支える社会資本とりわけ道路および橋梁は，現在，相当の資産量を，それぞれの“年代物”を含め，抱えるに至っている．橋長 15m以上の橋梁数でいうと 14 万橋を超えている．戦後とりわけ 1954 年（昭和 29 年）にスタートした第一次道路整備五箇年計画等に基づく計画的な道路整備の進捗に合わせて拡充が進み，その多くは 1960 年代から 1980 年代にかけて建設されている．一方，昭和一ケタや大正年間に架設され，今なお現役で社会に貢献しているビンテージものの橋梁も少なくない．これらを含め，次第に劣化や高齢化が目立ってきた．

産業活動と物流の目覚ましい発展に合わせ自動車規格の質的容量的向上も同時並行的に図られている．結果，産業道路と化した幹線道路では，大型車交通量が４割を超えるもの，夜間交通量が昼間を上回るものなどモータリゼーションの波は，予定した設計荷重をはるかに上回る勢いで，飲み込もうとしているかのようである．

橋梁をはじめ各種の構造物は，劣化する．劣化要因はさまざまである．その各要因に適した調査診断方法を用いて，置かれている状況を的確に把握するとともに，劣化程度と劣化部位に対し適切な回復方法がとられなければならない．これらのことを誠実に行おうとすると，まずは現状を適正に数値化することが重要である．その変化と履歴をつぶさに追いかけることで状況が明確になってくる．すなわち，量的に認識することから始めて，特性に合わせていろいろな対策シナリオを検討し，路線や個別の橋梁に適用しようと考える．合わせて，対応する新技術・新工法等で実績がない，または少ないものの用い方を適切に進めようと考えている．

こういった次第で，本研究プロジェクトでは下記のことを進めることとした．

延命化のための“道標”をつくろう！
モニタリングシステムを立ち上げよう！

特にモニタリングシステムは，基本事項の設計と実地検証のためのシステム構築を手がけた．一般社会に目を向けると，防犯や危機管理の観点からビジネスとしてのホームセキュリティを導入することが定着し，ごく普通に行われる時代になった．一般的な戸建て住宅でも夜間には常時監視システムが稼動し，異常感知時には点検・警備が行われている．ホームセキュリティで考える防犯対象を“劣化要因の侵入”ととらえると，我々は公共資産に対し，いわばインフラセキュリティをシステムとして機能させる必要がある．モニタリングシステムはこういった特徴を持つ仕組みとして機能させようと考えている．

本研究プロジェクトは，産学官がそれぞれの機能を効果的に発揮し，道路構造物の延命化技術に関する研究を連携して行っているものであり，これらの研究成果が，道路構造物の健全な維持と延命化に貢献することを願っている．

プロジェクトリーダー　京都大学大学院教授　宮川豊章

平成 18 年度延命化プロジェクトの研究目的と概要

我が国においては，橋長 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の対策が必要となる橋梁が増加する．このため，既設橋梁の健全性を把握し，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 18 年度の延命化プロジェクトでは，平成 17 年度において構築した延命化に資する技術（調査計測技術および補修補強技術）選定フローの拡充，鋼橋に対するモニタリングの継続とその常時稼動のためのシステム実装を行うとともに，インフラ・マネジメントに対する新しい方策の提案を行う．

技術選定フローの拡充では，調査法，補修・補強法等の先端的な技術を含む各種技術について，その性能や適性に応じて具体的工法の抽出が可能な選定システムソフトの枠組み作りを検討する．一方モニタリングシステムの実装では，対象となる鋼橋に対しシステムの設計と取付け工事を行い，実載荷荷重の特性把握と床版の疲労劣化に関する評価を行うことを目的に長期にわたる常時連続的なモニタリングを実施する．最後に，インフラ・マネジメントに対しての新しい方策（シナリオ）として，インフラセキュリティシステムの概念を提案し，その基本を構築することを目的とする．

なお，コンクリート橋の塩害に対する補修技術の性能検証を，前年度に引き続き継続している．

プロジェクト研究成果の要約

1) 延命化に資する技術選定フローの拡充を行い，適性や性能に応じて技術選定が行えるシステムの枠組みを提示した．
2) 鋼橋へのモニタリングシステムの実装を行い，補修補強工事前後の計測を行った．
3) インフラ・マネジメントに対する新しい方策の提案を行い，その基本を示した．

プロジェクト参加団体および参加者

【学】

宮川　豊章*1)	京都大学	工学研究科社会基盤工学専攻	教授
河野　広隆	京都大学	工学研究科都市環境工学専攻	教授
杉浦　邦征*2)	京都大学	工学研究科社会基盤工学専攻	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　貴士	京都大学	工学研究科社会基盤工学専攻	助手
大島　義信*3)	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
山田　安治	国土交通省近畿地方整備局	近畿技術事務所	副所長
有岡　暢晋	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）－

中山　昭二*3)	㈱ソーキ	新規事業プロジェクト部部長
日紫喜　剛啓	鹿島建設㈱	研究・技術開発本部技術研究所次長
大村　惠治	鹿島建設㈱	関西支店 OBP ｵﾌｨｽ土木部設計ｸﾞﾙｰﾌﾟ課長
山根　隆志	極東工業㈱	事業開発本部技術企画課課長
前田　敏也	清水建設㈱	土木技術本部技術第五部 ﾗｲﾌｻｲｸﾙｴﾝｼﾞﾆｱﾘﾝｸﾞｸﾞﾙｰﾌﾟ課長ｸﾞﾙｰﾌﾟ長
小俣　富士夫	ショーボンド建設㈱	補修工学研究所大阪試験室室長
田底　成智	中央復建ｺﾝｻﾙﾀﾝﾂ㈱	保全技術系グループ統括リーダー
太田　弘次	中央復建ｺﾝｻﾙﾀﾝﾂ㈱	保全技術系グループ主任
塩谷　智基	飛島建設㈱	防災 R&D ｾﾝﾀｰ技術研究所第一研究室主任研究員
大西　豊	㈱ニュージェック	大阪本社道路ｸﾞﾙｰﾌﾟ道路第二ﾁｰﾑﾏﾈｰｼﾞｬｰ
内田　諭	㈱ニュージェック	大阪本社道路ｸﾞﾙｰﾌﾟ橋梁ﾁｰﾑ主任
富山　春男	ﾊﾟｼﾌｨｯｸｺﾝｻﾙﾀﾝﾂ㈱	大阪本社交通技術部構造２ｸﾞﾙｰﾌﾟｸﾞﾙｰﾌﾟﾘｰﾀﾞｰ
蓮井　昭則	㈱間組	技術･環境本部技術研究所技術研究第一部部長
佐藤　昌義	㈱宮地鐵工所	保全部保全技術ｸﾞﾙｰﾌﾟｸﾞﾙｰﾌﾟﾘｰﾀﾞｰ
寺下　諭吉	八千代ｴﾝｼﾞﾆﾔﾘﾝｸﾞ㈱	大阪支店技術第一部部長
吉岡　正幸	八千代ｴﾝｼﾞﾆﾔﾘﾝｸﾞ㈱	大阪支店技術第一部主幹
能登　宥愿	橋梁技術塾	
真鍋　英規*4)	㈱富士ﾋﾟｰ･ｴｽ	関西支店技術部土木技術ﾁｰﾑﾁｰﾑﾘｰﾀﾞｰ副部長
金好　昭彦*4)	大鉄工業㈱	本社土木本部技術室室長
江良　和徳	極東工業㈱	大阪支店技術部補修課
奥野　正富*4)	ＮＴＴｲﾝﾌﾗﾈｯﾄ㈱	関西支店事業開発本部開発企画部部長
岩井　稔　*4)	鹿島建設㈱	土木管理本部土木技術部ﾘﾆｭｰｱﾙｸﾞﾙｰﾌﾟ課長

－ WG2（調査計測技術）－

真鍋　英規*4)	㈱富士ﾋﾟｰ･ｴｽ	前掲
奥野　正富	ＮＴＴｲﾝﾌﾗﾈｯﾄ㈱	前掲
橋村　義人	計測技研㈱	統括部長

小林　貞之	㈱間組	大阪支店土木部工事部長
高橋　謙一	オリエンタル建設㈱	大阪支店開発企画部ﾒﾝﾃﾅﾝｽﾁｰﾑ担当副部長
張　　建東	㈱ﾋﾟｰ･ｴｽ三菱	大阪支店土木統括部技術ｸﾞﾙｰﾌﾟ ｸﾞﾙｰﾌﾟﾘｰﾀﾞｰ
室田　敬	三井住友建設㈱	大阪支店土木部技術ｸﾞﾙｰﾌﾟ部長代理ｸﾞﾙｰﾌﾟ長

－ WG3（補修補強技術）－

金好　昭彦*4)	大鉄工業㈱	前掲
為石　昌宏	㈱鴻池組	大阪本店土木技術部主任
小川　光博	青木あすなろ建設㈱	大阪本店技術本部技術部担当課長
竹田　宣典	㈱大林組	技術研究所土木材料研究室 LCC ｸﾞﾙｰﾌﾟ ｸﾞﾙｰﾌﾟ長
岩井　稔	鹿島建設㈱	前掲
江良　和徳	極東工業㈱	前掲
宇野　洋志城	佐藤工業㈱	技術研究所主任研究員
丸屋　剛	大成建設㈱	技術ｾﾝﾀｰ土木技術研究所 土木構工法研究室主席研究員
芦田　公伸	電気化学工業㈱	青海工場無機材料研究ｾﾝﾀｰ主任研究員
田口　雅彦	東急建設㈱	大阪支店土木部担当部長
早川　健司	東急建設㈱	技術研究所土木研究室
辻子　雅則	飛島建設㈱	大阪支店土木部技術課課長
重金　治彦	飛島建設㈱	大阪支店営業第一部課長
松田　泰英	石川島播磨重工業㈱	橋梁事業部設計部計画ｸﾞﾙｰﾌﾟ課長代理
木本　輝幸	川田工業㈱	橋梁事業部四国技術部設計二課課長代理
利根川　太郎	住友金属工業㈱	土木橋梁部技術室設計ﾁｰﾑ課長
檜垣　孝二	住友重機械工業㈱	鉄構機器事業本部技術部西技術ｸﾞﾙｰﾌﾟ課長
佐古　周一	㈱ハルテック	技術ｸﾞﾙｰﾌﾟ設計部和歌山ﾁｰﾑ主任
川添　靖展	㈱淺沼組	大阪本店土木技術工務部技術ｸﾞﾙｰﾌﾟ主任

－ WG4（モニタリングシステム実装・計測）－

奥野　正富*4)	ＮＴＴｲﾝﾌﾗﾈｯﾄ㈱	前掲
都志　益一	㈱ソーキ	代表取締役
小林　貞之	㈱間組	前掲
永谷　秀樹	㈱宮地鐵工所	技術本部設計部技術開発ｸﾞﾙｰﾌﾟ課長代理

－ WG5（補修効果の検証）－

岩井　稔　*4)	鹿島建設㈱	前掲
宇野　洋志城	佐藤工業㈱	前掲
早川　健司	東急建設㈱	前掲

*1)　：プロジェクトリーダー
*2)　：サブリーダー
*3)　：全体幹事
*4)　：ワーキンググループ主査

総目次

はじめに i
平成 18 年度延命化プロジェクトの研究目的と概要 ii
プロジェクト研究成果の要約 ii
プロジェクト参加団体および参加者 iii
総目次 v

第 1 編　橋梁の現状と延命化
1　概要 1-1
2　既設構造物の現状 1-2
3　インフラセキュリティシステム 1-6
4　既設構造物の劣化と延命化 1-7
4.1　コンクリート橋の劣化と対策 1-7
4.1.1　疲労ひび割れ 1-7
4.1.2　塩害 1-9
4.1.3　アルカリ骨材反応 1-12
4.1.4　中性化 1-14
4.1.5　凍害 1-15
4.1.6　化学的侵食 1-18
4.2　鋼橋の劣化と対策 1-21
4.2.1　鋼橋の劣化 1-21
4.2.2　セキュリティシステムの構築 1-21
4.2.3　遠隔モニタリング 1-22
5　今後の課題と展望 1-23

第 2 編　調査・計測技術
1　概要 2-1
2　調査・計測技術の選定 2-1
2.1　調査・計測技術の選定 2-1
2.2　コンクリート構造物の各劣化機構に応じた調査・計測技術の選定 2-1
2.2.1　共通 2-1
2.2.2　塩害に対する調査・計測技術 2-2
2.2.3　アルカリ骨材反応に対する調査・計測技術 2-3
2.2.4　RC 床版の疲労に対する調査・計測技術 2-3
2.2.5　中性化に対する調査・計測技術 2-4
2.2.6　凍害に対する調査・計測技術 2-5
2.2.7　化学的侵食に対する調査・計測技術 2-5
2.2.8　PC 鋼材関連の劣化に対する調査・計測技術 2-5
2.3　鋼構造物の劣化に対する調査・計測技術 2-6
2.3.1　腐食に対する調査・計測技術 2-6
2.3.2　亀裂に対する調査・計測技術 2-8
3　調査・計測技術の現状と課題 2-9
3.1　調査・計測技術の現状 2-9
3.2　調査・計測技術の今後の可能性 2-9
3.2.1　技術開発の方向性 2-9
3.3　補修・補強後のモニタリング 2-9
3.3.1　概要 2-9

3.3.2　モニタリングの目的と位置付け　2-9
3.3.3　遠隔モニタリングシステム　2-10

第3編　補修・補強技術
1　概要　3-1
2　既設構造物の劣化現象　3-2
2.1 鉄筋コンクリート構造物の劣化機構　3-2
2.1.1 劣化要因の種別　3-2
2.1.2 劣化過程と対応策　3-2
2.2 プレストレストコンクリート構造物の劣化機構　3-3
2.2.1 劣化要因の種別　3-3
2.2.2 劣化過程と対応策　3-4
2.3　鋼構造物の劣化機構　3-4
2.3.1 劣化要因の種別　3-4
2.3.2 劣化過程と対応策　3-5
3　対応策と具体的対策工　3-7
3.1 鉄筋コンクリート構造物への対応策　3-7
3.1.1 対応策の要求性能と評価方法　3-7
3.1.2 要求性能に応じた対策工と具体的工法　3-7
3.2　プレストレストコンクリート構造物への対応策　3-9
3.2.1　対応策の要求性能と評価方法　3-9
3.2.2　要求性能に応じた対策工と具体的工法　3-9
3.3鋼構造物への対応策　3-10
3.3.1　対応策の要求性能と評価方法　3-10
3.3.2　要求性能に応じた対策工と具体的工法　3-10
4　延命化対策工選定システム　3-13

第4編　モニタリングの実施と実装システム
1　U橋の概要　4-1
2　モニタリング計画　4-1
3　計測技術　4-3
3.1　ひずみ計測，加速度計測　4-3
3.2　変位計測　4-4
4　モニタリングシステム　4-5
4.1　現地計測　4-5
4.2　遠隔モニタリング　4-5
4.3　光ファイバ通信による遠隔地での測定　4-6
5　管理計画　4-7
5.1　事前測定　4-7
5.1.1　基準車両　4-7
5.1.2　電気式センサ　4-8
5.1.3　OSMOS　4-11
5.2　管理画面のイメージ　4-12

第１編　構造物の現状と延命化

1　概要　1-1

2　既設構造物の現状　1-2

3　インフラセキュリティシステム　1-6

6　既設構造物の劣化と延命化　1-7
6.1　コンクリート橋の劣化と対策　1-7
6.1.1　疲労ひび割れ　1-7
6.1.2　塩害　1-9
6.1.3　アルカリ骨材反応　1-12
6.1.4　中性化　1-14
6.1.5　凍害　1-15
6.1.6　化学的侵食　1-18
6.2　鋼橋の劣化と対策　1-21
6.2.1　鋼橋の劣化　1-21
6.2.2　セキュリティシステムの構築　1-21
6.2.3　遠隔モニタリング　1-22

7　今後の課題と展望　1-23

1　概要

日本の近代化土木遺産に多数の橋梁が含まれる．殖産興業という目標とその時流にあって，列強先進国の新技術を導入・吸収し，早くに肩を並べたいとの意気込みで，若き技術者たちは情熱を燃やしていた．かつて，ここにも熱い時代があった．

日本最初の鉄筋コンクリート橋は，フランスの技術を導入しセメントや鉄筋を輸入しながら 1903 年 7 月京都市に完成した．大学を卒業したばかり青年技師・田邊朔郎の手によるもので，「本邦最初鉄筋混凝土橋」の碑とともに現橋が今も残されている．鉄の橋は，それに遡ること 35 年．1868 年長崎市に建設された，くろがね橋が最初である．ここでも輸入材が用いられたが，10 年後には国産の鉄を使用した橋梁が早くも架けられている．プレストレストコンクリート橋はこれらに比べると新しく昭和 26 年（1951 年）石川県七尾市に架けられた長生橋が最初である．

このように材料革新による新素材の導入と，土木・橋梁工学の発展による設計施工における新技術新工法の導入などにより，橋梁をはじめとする道路構造物は，遅滞することなく常に進化してきた．それは，経済性の向上を図るとともに不可能を可能に，夢を現実に変えてきた．山間部，荒廃渓流，沿岸・海上部，急斜面上，軟弱地盤上，屈曲部や都市内錯綜部など至る所で架橋を可能にし，道路網を築き上げ，社会生活や産業活動にかかせない社会基盤として発達してきた．

その社会基盤としての橋梁がいま危機に瀕している．高齢化等に伴う各種劣化要因により，荒廃が進み，抜き差しならない事態にまで至るシナリオが想定される状況である．これらのことがらは，既設構造物の延命化に関する研究が重要であり，喫緊の課題であることをいみじくも現している．

ここでは，まず橋梁の現況を俯瞰する．次いで，劣化の実態を把握するとともに，損傷劣化要因について概説する．以下，適切な調査方法と補修方法の選定に至る一般的な維持管理手法に加え，新しい手法を提案する．すなわち，道路と橋梁の交通特性に鑑み，選択的・重点的な路線の代表的橋梁への対策工法と位置づけた常時監視システムを中心とした「インフラセキュリティシステム」を提案する．

また，本プロジェクトが行ったモニタリングデータによる荷重の実態とそれから推定される疲労損傷度の算定を行った．同時に，既往の補強工法の延命効果についても，評価を試みる．これは実数把握により路線と橋梁の置かれている道路特性を明らかにするためのもので，現地に構築中の常時遠隔モニタリングシステムによる計測システムに連動することで，情報価値がさらに高まるものと考えている．

高齢化が進む数々の構造物の現状にあって，直面する劣化要因の侵入をいかに防ぎ，あるいはいかに遅らせるか，また，いかにそれらの危険情報を自動的かつシステマティックに検出するか，これらは構造物の延命化という命題に対する大きな課題である．他方，超過荷重等，想定外の要因に対する損傷から構造物を守り，できるだけ長持ちさせる方策を講じることもまた重要である．安全かつ安心で快適な道路交通を常時維持するために，価値あるシステムや適切な技術方策の提案，検証を進めるものである．

2　既設構造物の現状

現在，橋長 15m 以上の道路橋は 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[1) 2)]．その内訳は，**図 1-2.1～図 1-2.4** に示すとおり，橋数では RC，PC などのコンクリート橋が半数以上を占めるが，橋梁の延長で比較すると鋼橋の割合が大きい[1)]．

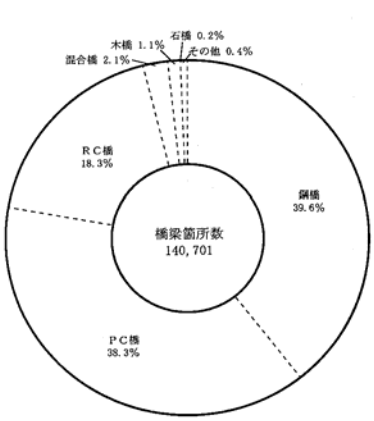


図 1-2.1　橋種別橋梁箇所数比率

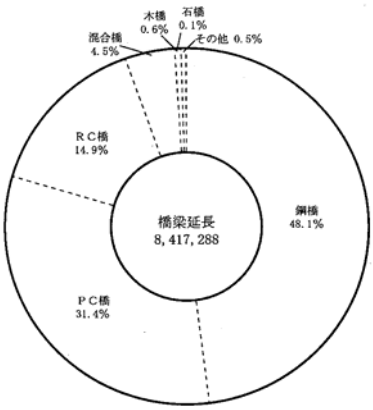


図 1-2.2　橋種別橋梁延長比率

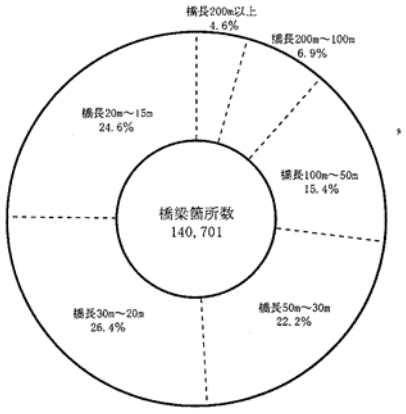


図 1-2.3　橋梁延長別箇所数比率

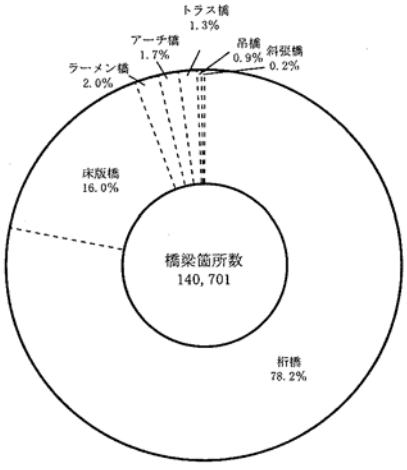


図 1-2.4　橋梁構造形式別橋梁箇所数比率

現在供用中の総道路橋数と建設数の推移は，**図 1-2.5** に示すとおりである．高度成長期に大量に建設されており，そのまま高齢化が進むとこれら橋梁群の平均年齢のピークが 2020 年代には約 55 歳付近に来ることがわかる．（**図 1-2.6** 参照）また，55 歳以上の橋梁が 2001 年時点では約 1100 橋程度であるのに対し 2021 年には，20,000 橋を超えることになり高齢化する橋梁が加速度的に増加してゆくことになる．[2)]

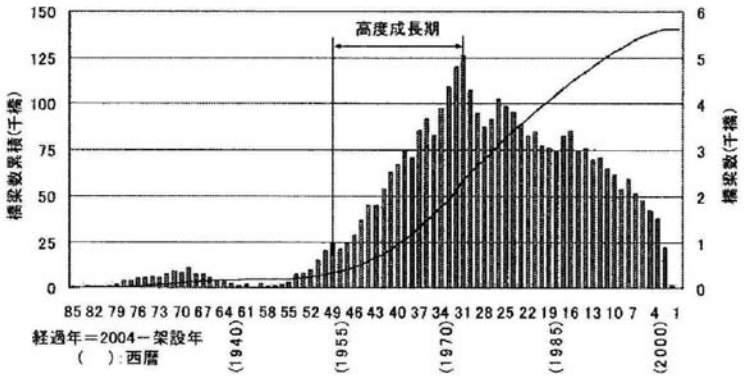


図 1-2.5　総道路橋数と建設数の推移

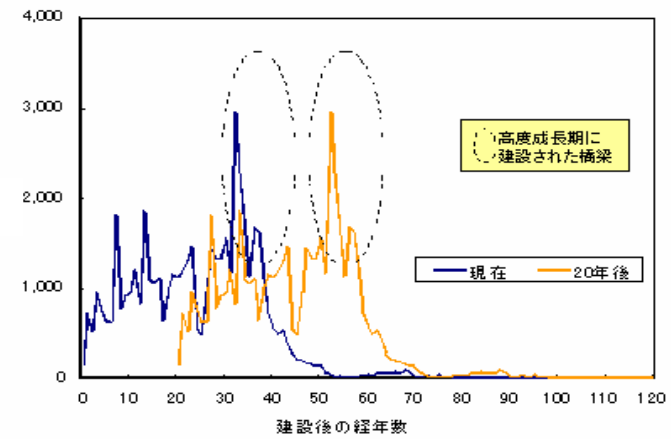


図 1-2.6　橋梁群の平均年齢

近畿地方整備局管内の全橋梁の架設竣工年を**図 1-2.7** に示す．全国版とは幾分異なったグラフを示すものの，高度成長期に大量に建設されたものが高齢化していく様子は同様の状態と考えられる．橋長 15m以上の橋梁に着目し大きなイベント情報と重ね合わせるとわかりやすい．(**図 1-2.8** 参照)図中の最も高齢化した部分を詳述した図が，**図 1-2.9** である．

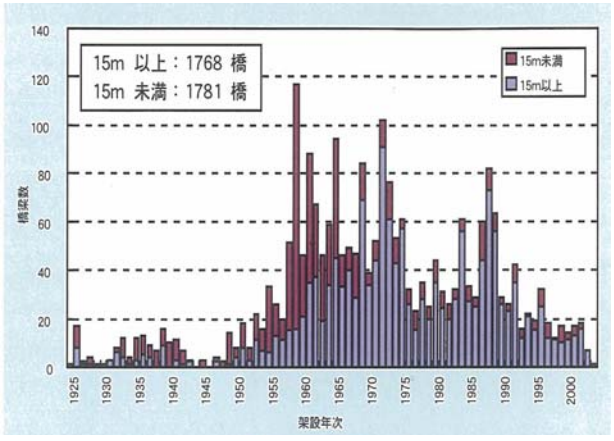


図 1-2.7　橋梁の架設数と竣工年 [4)]

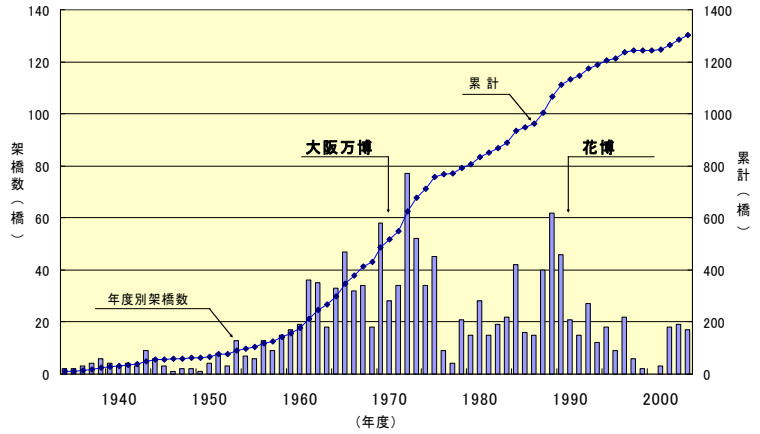


図 1-2.8　イベント情報と架橋数

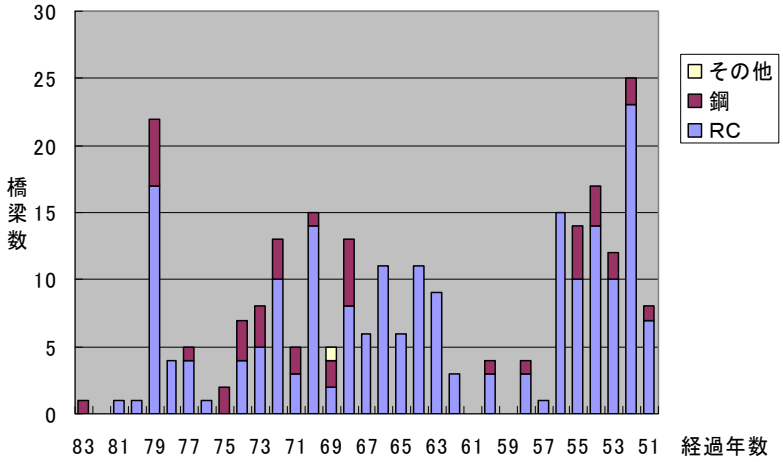


図 1-2.9　架橋数の内訳

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．（図 1-2.10 参照）[2)]

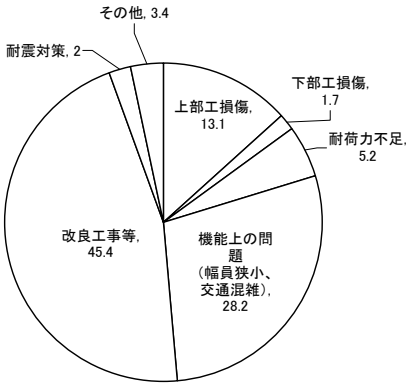


図 1-2.10　架け替えの理由

また，上部工に関する架け替えの理由は図 1-2.11 に示すとおりである．すなわち鋼橋に関しては，床版の損傷による架け替えが 67%であり，続いて鋼材の腐食が 26%となっている．また PC 橋，RC 橋に関しては，コンクリート自体の亀裂や剥離が半数を占める一方，床版の損傷が 3 割程度を占め，全形式を通じで床版の損傷が顕著であるといえる [3)]．

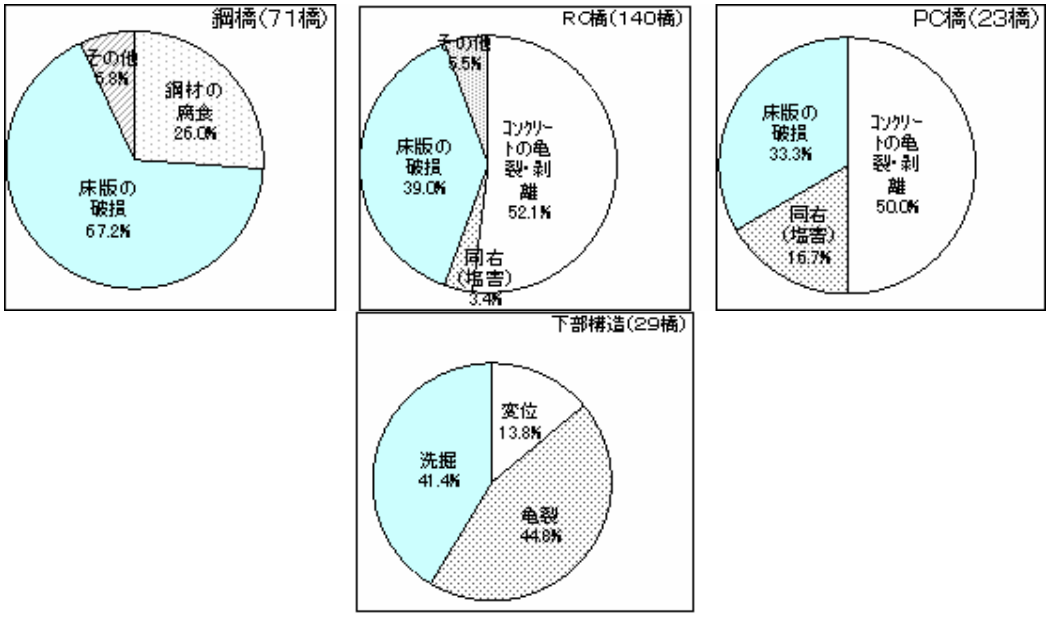


図 1-2.11　橋梁の架け替え理由

【参考文献】
1)　国土交通省道路局企画課監修：道路統計年報 2002（平成 12 年度），平成 14 年 11 月
全国道路利用者会議　発行
2)　橋梁マネジメント研究会：道路橋マネジメントの手引き，平成 16 年 8 月
(財)海洋架橋・橋梁調査会　発行
3)　建設省土木研究所橋梁研究室：土木研究所資料第 3512 号橋梁の架替に関する調査結果（Ⅲ），平成 9 年 10 月
4)　国土交通省近畿技術事務所：近畿技報「繋　Kei」Vol.13，平成 18 年 1 月

3　インフラセキュリティシステムの提案

一般社会に目を向けたとき，防犯や危機管理の観点からセキュリティシステムを導入することが広く認識され，ビジネスモデルとして定着するとともに，ごく普通に行われる時代になっている．一般的な戸建て住宅においても夜間には常時監視システムが稼動し，異常感知時には契約先会社からの点検・警備が行われている．このホームセキュリティシステムで考えている防犯対象を“劣化要因の侵入”ととらえると，公共資産・構造物に対しても，いわばインフラセキュリティをシステムとして機能させることが効果的であると考えられる．以下で述べるモニタリングシステムは，こういった特徴を持つ仕組みとして機能させようと考えている．

すなわち，われわれは，既設橋の維持管理における対策方法・シナリオの一つとして以下の事を行うこととした．

- 比較的安価で，長期にわたる安定した計測・情報伝達手法を用いること
- 遠隔化，自動化し管理者等が居ながらにして，危険情報を察知できること
- 保守点検作業を省力化，自動化，ロボット化すること
- 非破壊・非接触の計測調査手法を取り入れること
- 常時継続的監視下に置いて集中的・機動的な点検管理を果たせること

ここでは，既設橋の「インフラ･セキュリティ･システム」と呼称することとし，基本フレームを**図 1-3.1** に示す．下図中の「モニタリングの実施」では，基本事項の設計と実地検証のためのシステム構築を手がけた．

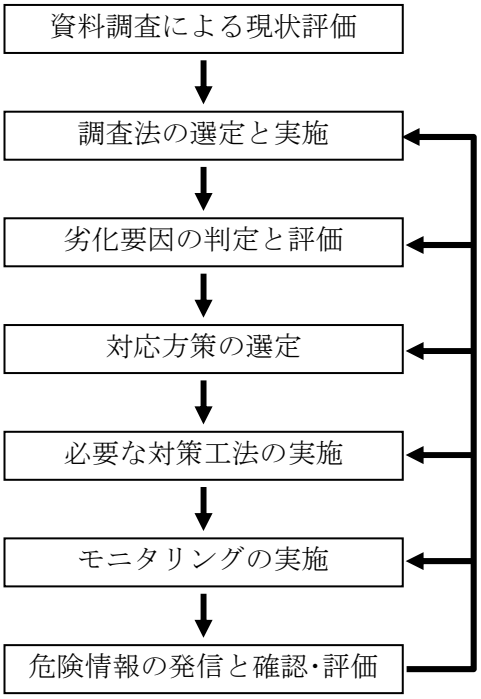


図 1-3.1　インフラ･セキュリティ･システムの基本フレーム図

4　既設構造物の劣化と延命化

ここでは，構造物の劣化要因について整理を行い，それぞれの劣化要因に対するセキュリティシステムの考え方について，基本を示す.

4.1　コンクリート構造物の劣化

4.1.1　疲労ひび割れ

(1)　劣化の形態

材料の静的強度に比較して一般に小さいレベルの荷重作用を繰返し受けることにより破壊に至る現象を疲労あるいは疲労破壊という．コンクリート構造物における疲労現象は，繰返し荷重によりその構成材料である補強鋼材（鉄筋やPC鋼材など）に亀裂やコンクリートにひび割れが発生し，これらの疲労損傷による部材の性能低下が起こり，最終的には常時の荷重作用下において破壊に至る現象である.

鉄筋コンクリート構造物の疲労は，はり部材の疲労と床版の疲労に分類することができる．はり部材においては一部を除いて補強鋼材の疲労に注目するのが一般であるのに対し，床版の疲労では下面ひび割れの方向性や密度が着目点となる.

床版の疲労がどの過程にあるかは，床版下面のひび割れ状態を観察することにより比較的容易に評価判定できるが，ひび割れ密度は飽和することがあるため，期間を定量的に表すものではない．この場合，外観の変状に加えてひび割れの幅や深さ，ひび割れの開閉量や段差量などのひび割れ挙動の観測や，漏水や遊離石灰の流出状況および路面の変状などの観測が必要となる．加えて床版剛性の低下に対する指標であるたわみの測定が有効となる．**表 1-4.1** に疲労劣化の症状，**図 1-4.1** に進行過程と外観の変状を示す.

表 1-4.1　RC 床版の疲労の症状

	劣化の状態
潜伏期 (状態Ⅰ)	乾燥収縮もしくは載荷による，主筋に沿った一方向ひび割れが数本程度確認できる段階．主桁の拘束条件によっては乾燥収縮や主桁温度変化による橋軸直角方向のひび割れが進行することもある.
進展期 (状態Ⅱ)	主筋に沿った曲げひび割れが進展するとともに，配力筋に沿う方向のひび割れも進展し始め，格子状のひび割れ網が形成される段階．外観上ひび割れの密度の進行は著しいが，鉄筋コンクリート床版の連続性は失われていない.
加速期 (状態Ⅲ)	ひび割れの網細化が進み，ひび割れ幅の開閉やひび割れ面のこすり合わせが始まる段階．ひび割れのスリット化や角落ちが生じるとコンクリート断面の抵抗は期待できないので，鉄筋コンクリート床版の耐力は急激に低下し始める.
劣化期 (状態Ⅳ)	床版断面内にひび割れが貫通すると床版の連続性は失われ，貫通ひび割れで区切られた梁状部材として輪荷重に抵抗することになる段階．貫通ひび割れの間隔やコンクリート強度，配筋量などが部材としての終局耐力に影響するだけでなく，雨水の浸透や鉄筋腐食などにも配慮する必要がある.

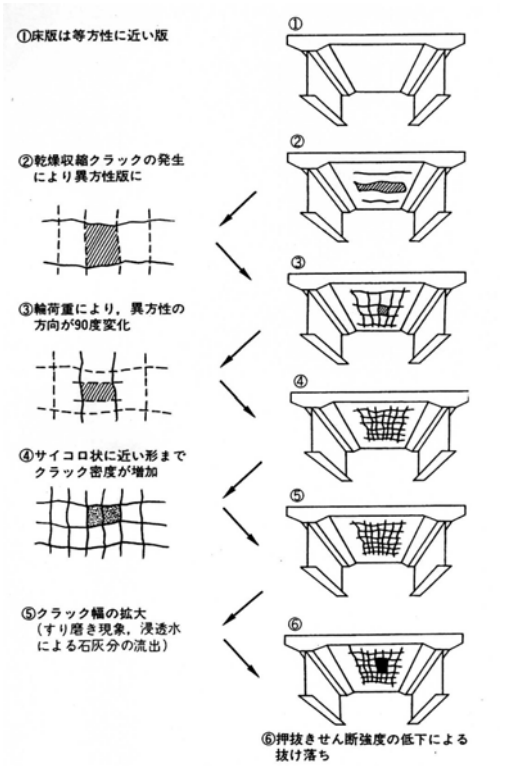


図 1-4.1　RC 床版の疲労劣化

(2) インフラセキュリティシステム

床版疲労ひび割れに対するインフラセキュリティシステムについて，調査および評価までの基本構成を**表 1-4.2** に示す．ここでは，モニタリングによる監視を中心として，セキュリティの確保を行う．詳細は **4.2** を参照のこと．

表 1-4.2 疲労ひび割れに対するインフラセキュリティシステムの概要

大分類	小分類	概要
資料調査 （事前調査）	調査内容	・床版構造の把握(床版厚，配筋量) ･･･設計図書の調査，竣工年度の当時の設計基準から推定（設計図書がない場合） ・構造物条件の把握 ･･･所在地の特徴，環境条件（沿岸地域，凍結防止剤の使用） ・防水層有無の確認 →貫通ひび割れ時の漏水による擦り磨き防止 ・点検調書 ・交通量データ
調査・ モニタリング の実施	項目	①ひび割れの方向性と密度 ②ひび割れ幅 ③ひび割れ開閉の有無 ④ひび割れ段差の有無 ⑤床版たわみ ⑥外力調査 ⑦外観変状（漏水，遊離石灰） ⑧路面状況
	内容	①床版下面の写真撮影により定期的に観察 ②πゲージ，FBG ひび割れ計などによるひび割れ幅測定 ③πゲージ，FBG ひび割れ計などによるひび割れ開閉量測定 ④πゲージ，FBG ひび割れ計などによるひび割れ段差測定 ⑤レーザー変位計，OSMOS，FBG などによる床版たわみ量測定 ⑥応力頻度測定，加速度計，無線センサなどによる通過輪荷重と頻度の測定 ⑦床版下面の写真撮影により定期的に観察 ⑧路面点検
	効果，適用性	①，⑦，⑧現地調査または CCD カメラを用いた無人撮影，遠隔撮影． ②～⑥現地計測または無線センサ，光ケーブルなどを活用した常時遠隔モニタリング
評価と危険情報の提供	閾値の設定	①，②は表-2 に示す数値を提案する． ③～⑤は，微小な変動値が観測された段階で深刻な状況であるため，閾値ではなく有無で判定．ただし，劣化進行とともに各測定値の変動幅が大きくなることが予想されるため，閾値の数値化検討も必要． ⑥は対象構造物の設計輪荷重以上の軸重通過を検出する． ⑦定性的判断となるが，漏水，遊離石灰の有無を確認する． ⑧定性的判断となるが，路面の舗装割れなどの状況を確認する．
	モニタリング結果の評価	・ 床版疲労の潜伏期に対しては，①にて監視可能．ひび割れ発生状況が橋軸直角方法一方向のみであるうちは，そのまま供用し，点検・モニタリングを継続する． ・ 進展期から加速期に対しては，①～⑥までのアクションを段階的に行うことが必要．まずは①にてひび割れ方向性，密度を監視し，閾値を超えてきたら②，③，④でひび割れの変動の有無に関するモニタリングを実施する．ひび割れ開閉や段差，床版たわみなどが観測されるようであれば補修・補強対策を検討する．⑥の外力調査は床版疲労の主たる原因特定のために必要である．また，床版下面に漏水や遊離石灰などの外観変状が見られるようになると，ひび割れが床版を貫通したと判断されるため，⑦により劣化程度を推定する判断材料が得られる． ・ 劣化期ではひび割れ密度は飽和していることが多い．この段階では床版たわみが大きくなり，また床版抜け落ちや舗装割れなど著しい外観変状が見られるようになるため，主に⑤，⑦，⑧にて判断することができる．考えられるシナリオは，床版打ち替え，前面補修，供用制限などがある．
	危険情報	③，④，⑤，⑥は危険情報の確認手法となる．いずれも遠隔操作による常時モニタリングが可能であるため，危険情報から迅速な対応策検討に繋げることが可能．

4.1.2　塩害

(1)　劣化の形態

塩害とは，コンクリート中の鋼材が，塩化物イオンの存在により腐食を促されて，腐食生成物の体積膨張が，コンクリートのひび割れや剥離を起こしたり，鋼材の断面減少を起こしたりすることである．近年，海岸地域などのコンクリート構造物において，コンクリート中の塩分により鋼材が腐食し，かぶりコンクリートにひび割れが生じたり，はく離したりするなどの損傷が報告され，社会問題となっている．

コンクリート中に一定量以上の塩化物イオン（Cl^-）が存在すると，コンクリートが中性化していなくても鉄筋などの内部鋼材の腐食が進行する．さらに，コンクリートが中性化した場合には，腐食の進行は加速されることとなる．このように塩化物イオンはコンクリート構造物にとっては大敵であり，コンクリートへの塩化物イオンの侵入はできるだけさけなければならない．

(2)　インフラセキュリティシステム

塩害劣化に対するセキュリティの確保は，劣化進行の速度を勘案し，定期モニタリングにより行われる．塩害に対するセキュリティシステムの考えを以下に示す．

1）資料調査による現状評価

現状を評価するために，**図 1-4.2** の資料を収集する．

2）調査方法の選定

図 1-4.3 に挙げる調査を選定する．

3）塩害の判定

図 1-4.4 の項目に着目して，塩害を判定する

MICHIデータ
橋梁台帳
設計図書
施工記録
しゅん工書類
立地条件
雪氷回数（凍結防止剤の目安）
補修補強工事履歴
既往点検記録

図 1-4.2　収集する資料

目視調査
打音検査
含有塩分量試験（コア、ドリル、塩分センサ、塩分計）
かぶりの調査（電磁誘導法・電磁波反射法）
鉄筋腐食調査（かぶりコンクリート除去）
鉄筋腐食状態調査（自然電位法、分極抵抗法）

図 1-4.3　調査技術

・海砂が使用されている ・飛来塩分の影響がある ・凍結防止剤が散布されている
・凍結融解作用の影響は小さい
・温泉地ではない ・土壌における酸性劣化、硫酸塩劣化の影響は小さい
・ASR特有の網状ひび割れやアルカリシリカゲルがほとんど認められない ・反応性骨材を使用している可能性は小さい
・鉄筋コンクリート床版において、疲労損傷の影響は小さい
・鉄道橋の鉄筋コンクリートはりのような疲労損傷の影響は小さい
・中性化の影響は小さい

図 1-4.4　塩害の判定

4）外観上のグレード
　図 1-4.5 のグレードに区分される.
5）対策のシナリオ
　グレードに応じて　図 1-4.6 のシナリオが考えられる
6）工法の選定
　対策工法として，図 1-4.7 のものがある.

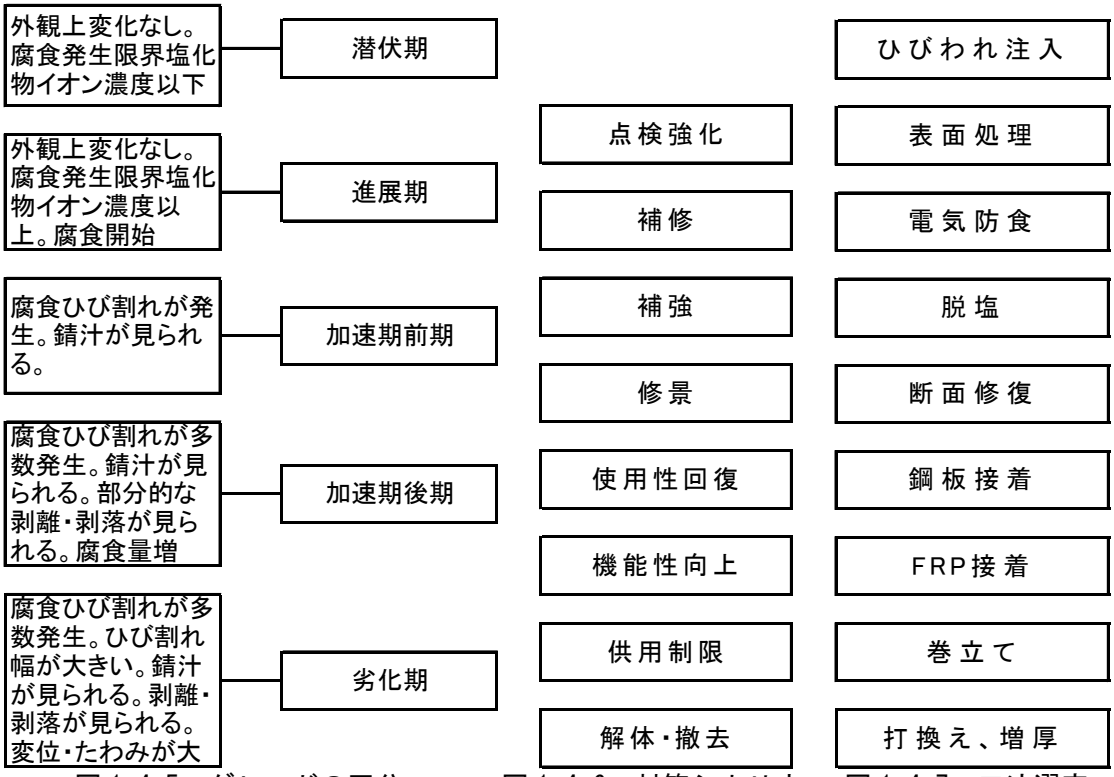


図 1-4.5　グレードの区分　　図 1-4.6　対策シナリオ　　図 1-4.7　工法選定

7）モニタリング項目
　塩害におけるモニタリング項目として以下のものがある.
- 排水の含有塩分量（塩分センサ）
- 表面塩分量，付着塩分量（塩分計）
- 含有塩分量（コア採取）
- 電気化学的指標
- 腐食ひび割れの発生・変化
- 鉄筋腐食（腐食ランク）

8）モニタリングの頻度・期間
　各モニタリング項目の頻度・期間の現状は以下の通りである.
① 排水の塩分含有量：排水管内に塩分センサを設置する．データを蓄積できるならば常時計測可能.
② 表面塩分量，付着塩分量：部材表面を湿らせて，塩分計により塩分量を求める．下フランジの上側が高い値を示す．傾向を把握するために，季節ごとに計測する．年単位の変動は少ない？
③ 含有塩分量：コアを採取するため，頻度を多くできない．定期点検時（5 年に 1 度で十分）

④　電気化学的指標：自然電位法よりも，腐食電流が分かる分極抵抗法が有利．定期点検時（5 年に 1 度）に実施したい．
⑤　腐食ひび割れの発生・変化：目視点検で発見できる．定期点検時（5 年に 1 度）
⑥　鉄筋腐食：かぶりコンクリートをはつり取り，直接確認する手法しかない．腐食ひび割れ発生時に行う．

9）モニタリングの将来性
①および②排水の含有塩分量，表面塩分量，付着塩分量：コア採取と比べて非破壊で実施できるのが長所である．遠隔モニタリングも可能である．ただし，排水塩分量や表面塩分量の閾値はない．（高ければ塩害環境にあるということは言えるが）
③コア採取：閾値があり，最もモニタリングしやすい項目．しかし，破壊試験を実施するため，回数が制限される．
④電気化学的指標：分極抵抗法により，腐食速度が分かる．劣化予測が可能．ただし，それが実態にあうかの検討が不足している．
⑤腐食ひび割れ：現状である程度確立されている．点検者が腐食ひび割れと判断できるかが課題．腐食ひび割れの発生は，主筋直角方向に，光ファイバを渡して，ひび割れ発生により光ファイバにテンションがかかることを利用してモニタリングすることが考えられる．
⑥鉄筋腐食：鉄筋腐食現状である程度確立されている．⑤よりも明確な手法である．

10）モニタリングの効果・意義・適用性
①および②排水の含有塩分量，表面塩分量，付着塩分量：コンクリート構造物，鋼構造物どちらにも適用可能．現状では目安レベル．
③コア採取：Fick の拡散式により，将来的な塩分量分布の予測が可能．コンクリート標準示方書【維持管理編】に示されているオーソライズされた手法である．
④電気化学的指標：腐食速度により，腐食量が分かる．これを⑤や⑥と比べて，実態と整合しているか検証できれば，塩分量分布よりも直接的な塩害予測が可能．
⑤腐食ひび割れ：現状では，最も適用されている．
⑥鉄筋腐食：表面的にひび割れや浮き・剥落当の劣化現象が顕在化していないと，無駄に構造物を損傷することになる．劣化現象が顕在化している場合に実施する．

11）　危険情報（閾値）の設定と評価
モニタリングで提示した項目について，現状での閾値の設定方法は**表 1-4.3** の通りである．

表 1-4.3　閾値の設定

閾値の設定と変更	①および②は，閾値なし．強いてあげるのならば，海水の塩分濃度の 30%といった閾値が考えられないか． ③1.2kg/m³．ただし，これを下回っていても腐食している事例や，10kg/m3 を超えても腐食していない事例あり． ④自然電位（－0.35V　vs　CSE　で 90%以上の確率で腐食）分極抵抗（26kΩcm² で激しい腐食）比抵抗（5,000 未満で腐食性大） ⑤例えば，腐食量 0.3%で，腐食ひび割れ発生，腐食量１%で浮き・剥落が発生というように関連付けられれば，閾値となりうる． ⑥コンクリート標準示方書【維持管理編】に示されている．（点錆び，表面錆び，欠損等）
モニタリング結果の評価	付着塩分量：鋼構造物に有効．閾値がないため，目視点検との関連付けが必要． 含有塩分量：コンクリート構造物に有効．目視点検結果とのすり合わせが必要． 鋼材腐食進行度，鋼材断面欠損率：設計計算書をもとに耐荷力評価が可能． 耐荷力評価，たわみ増加：元設計の何%低下したかで補強量を決める．
危険情報の確認手法	⑤や⑥が危険情報の確認手法となる．載荷試験も考えられる．ただし橋梁は適用可能だが，シールドトンネル等の地下構造物は適用不可．
フィードバック方法	⑤や⑥の実態を①～④の閾値設定にフィードバックさせる．実態は⑤や⑥の結果により，補修・補強・供用禁止等の措置がとられる．

4.1.3　アルカリ骨材反応（ASR）

(1)　劣化の形態

アルカリ骨材反応（以下，「ASR」と呼ぶ）とは，骨材中のある種のシリカ鉱物や炭酸塩岩がコンクリート中のアルカリ性水溶液と反応して，コンクリートに異常な膨張およびそれに伴ってひび割れが発生する現象である．

従来は，発生したひび割れが進展することにより，コンクリート中の鋼材が腐食することが大きな問題とされていたが，近年，折り曲げ部付近の鋼材がほとんど腐食せずに破断することが報告されている．

(2)　インフラセキュリティシステム

ASR に対するセキュリティの確保は,膨張の監視を通じて行うことを基本とする．**図 1-4.8** に，セキュリティシステムの基本フローを示す．また各段階におけるそれぞれの考え方について，以下に示す．

1）シナリオの構築

下記の項目を考慮してシナリオを構築する．

- 予防保全，事後保全，使い捨ての吟味
- 優先順位付け
- 予算計画と平準化
- 耐震安全性向上のための補強，耐荷力不足解消のための補強との関連付け

構造物の外観上のグレードと対策を**表 1-4.4** に示す．

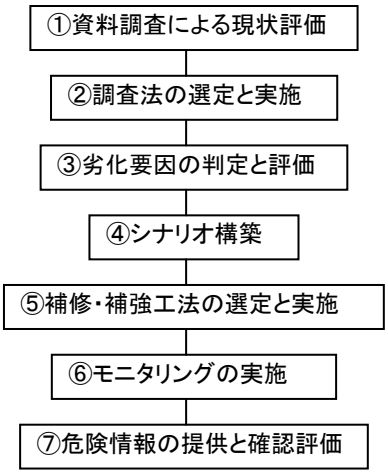


図 1-4.8　ASR 劣化コンクリート構造物のインフラセキュリティシステム(案)

表 1-4.4　構造物の外観上のグレードと対策

構造物の外観上のグレード	点検強化	補修	補強	修景	使用性回復	機能性向上	供用制限	解体・撤去
Ⅰ（潜伏期）	○	(○)						
Ⅱ（進展期）	○	◎		◎	○	○		
Ⅲ（加速期）	◎	◎	○	◎	○	○	○	
Ⅳ（劣化期）	◎	○	◎	○	◎	◎	◎	◎

また，対策として下記の項目を検討した方がよい.

① 部分補修（雨掛かり部分のみなど）
② 全面補修（変状が構造物全体に発生しているが，鉄筋破断は認められない）
③ 補修（ASR の進行抑制，劣化部除去）＋補強（ASR の膨張拘束，耐荷力向上，鉄筋破断対応）
④ 存置（継続調査）
⑤ 無補修・更新

2) 補修・補強工法の選定と実施

補修・補強に期待する効果と工法を**表 1-4.5**，構造物の外観上のグレードと標準的な工法を**表 1-4.6** に示す．諸条件を考慮して適切な工法を選定し，実施する.

3) モニタリングの選定と実施

モニタリングの種類と内容を**表 1-4.7** に示す．モニタリングは常時測定することを原則とし，ASR の進展と対策の効果を把握することを目的とする.

表 1-4.5　補修・補強に期待する効果と工法

期待する効果	工法例
ASR の進行を抑制	表面処理（被覆，含浸），ひび割れ注入
ASR の膨張を拘束	プレストレスの導入，鋼板・PC・FRP 巻立て
劣化部を取り除く	断面修復
耐荷力を向上	鋼板・FRP 接着，プレストレスの導入，増厚， 鋼板・PC・FRP 巻立て，外ケーブル

表 1-4.6　構造物の外観上のグレードと標準的な工法

構造物の外観上のグレード	標準的な工法
Ⅰ（潜伏期）	予防的措置として表面処理
Ⅱ（進展期）	表面処理
Ⅲ（加速期）	表面処理，断面修復，プレストレスの導入
Ⅳ（劣化期）	断面修復，鋼板・FRP 接着，プレストレスの導入， 鋼板・PC・FRP 巻立て，外ケーブル

表 1-4.7　モニタリングの種類と内容

モニタリングの種類	内容
πゲージ（コンタクトゲージ）によるひび割れ幅測定	ひび割れ幅が経時的に大きくなっていれば，膨張が継続していると考えられる．
ひずみゲージによるひずみ（鉄筋，コンクリート，補強材）の遠隔測定	ひずみが経時的に大きくなっていれば，膨張が継続していると考えられる．
監視ｶﾒﾗによる変状の遠隔観察	新たなひび割れやアルカリシリカゲル，あるいは補修・補強材料に外観上の変状が発生していないかを確認する．
光ファイバによるひずみ（膨張量）の遠隔測定	ひずみが経時的に大きくなっていれば，膨張が継続していると考えられる．

4）危険情報の提供と確認評価

危険情報として，下記の項目が挙げられる．

- 鉄筋破断の有無
- 膨張量
- 耐荷力の低下度合い

以上の項目を勘案して，構造物の安全性などを評価する．

4.1.4　中性化

(1)　劣化の形態

打設直後のコンクリートは，セメントが水和することによって生じる水酸化カルシウムが存在することで強アルカリ性(PH12～13)を示す．これは，長期間を経ると空気中の二酸化炭素等の影響により，炭酸カルシウムに変化することによって，強アルカリから中性へ変位する．これが中性化である．

コンクリートが中性化することにより，コンクリートの組織が緻密化するという説と，粗雑化するという説とがあり，現在は緻密化するという説の根拠がやや卓越している．いずれにしろ，コンクリート自体は，中性化により，その強度が低減するということが言えないのが現状である．中性化による影響は，鉄筋コンクリートにおける鉄筋の腐食が進行することであり，これにより鉄筋コンクリート全体が劣化することである．

(2)　インフラセキュリティシステム

中性化に対するセキュリティの確保は，定期的なモニタリングにより行われる．また鉄筋腐食の進行に関するモニタリングも重要な手段となる．以下では，中性化で劣化した構造物の評価およびモニタリングについてまとめる．

1)　評価

中性化による構造物の性能低下は，鋼材の腐食に起因するため，構造物が潜伏期，進展期，加速期，劣化期のいずれにあるかに十分留意して，影響を受ける性能を評価する必要がある．

鋼材の腐食調査では，かぶりコンクリートの部分をはつり取って鋼材を露出させ，腐食の有無，位置，腐食面積，重量，孔食深さなどを直接測定することが重要である．鋼材腐

食に関する定量的なデータを得ることは，鋼材の劣化状態や構造物の性能低下状態を定量的に評価することにつながるため，詳細な調査を行うことが大切である．

一方，コンクリートおよび鋼材の状態が必ずしも構造物の性能と直接結びつかない場合には，外観の変状は性能評価のための有力な情報となる．中性化によって性能低下が生じた構造物の外観上のグレード分けを**表 1-4.8** に示す．

構造物の諸性能を定量的に評価することは，理想的であるが，現状では必ずしもこのような手法が確立していない状況にある．そのため，現実的には構造物の外観変状からグレーディングを行い，構造物の性能低下を半定量的に評価することとしているのが現状である．

表 1-4.8　構造物の外観上のグレードと劣化の状態（屋外の場合）[5)]

構造物の外観上のグレード	劣化の状態	中性化深さとかぶりの関係
状態Ⅰ （潜伏期）	外観上の変状が見られない．	中性化深さは小さく，鉄筋位置までにはかなりの距離がある．
状態Ⅱ （進展期）	少数の錆汁が見られる． 少量の腐食ひび割れが発生する．	中性化深さが鉄筋位置まで一部到達している．
状態Ⅲ （加速期）	多数の錆汁が見られる． 多数の腐食ひび割れが発生する． 部分的なかぶりコンクリートの浮き・剥離・剥落が発生する．	中性化深さが鉄筋位置までかなり到達している．
状態Ⅳ （劣化期）	多数の錆汁が見られる． 多数の腐食ひび割れが発生する．ひび割れ幅が大きい． 多数のかぶりコンクリートの浮き・剥離・剥落が発生する． 変位・たわみが大きい．	中性化深さが鉄筋位置まで半分以上到達している．

2)　中性化のモニタリング

中性化深さは，フェノールフタレイン法によれば，pH8．2～10 以下の未着色部分を中性化部と判定する．鉄筋腐食は，pH４以下で開始するので，鉄筋の腐食は，中性化部分より内部で発生することになる．一方，実験や調査により，中性化深さが鉄筋位置に達する相当前に腐食が開始している．腐食の開始と中性化の関係は，中性化残り（鉄筋のかぶり厚さと中性化深さの差）によって整理されており，塩化物を含まないコンクリートで約 8㎜，塩化物を含むコンクリートで約 20㎜ とされている．炭酸化反応により細孔溶液中に解離した硫酸イオンと塩化物イオンの影響であると考えられる．ただし，pH の低下による不動態皮膜の消失は鉄の腐食反応を起こしやすくする補助的な現象であり，酸素と水の存在と不動態皮膜の破壊が同時に起こってはじめて腐食反応が進行する．

以上より，中性化と鉄筋腐食のそれぞれのモニタリングが必要であり，セキュリティの確保はそれぞれのモニタリングを通じて実現される．中性化の劣化進行は緩慢であり，定期的なモニタリングによるセキュリティ確認で対応できるものと考えられる．

4.1.5　凍害

(1)　劣化の形態

凍害とは，コンクリート中の自由水や吸水率の大きい骨材の水分が凍結融解作用を繰り返し受けることによりひび割れが生じたり，表層部が剥離したりして表層に近い部分から破壊して次第に劣化してゆく現象である．一般に，水が拘束のない自由な状態で凍結した場合の膨張率は 9%といわれている．また寒冷地では，日光の直射を受けにくい北側面と日光の直射を受ける南側面とでは，南側面において凍結融解が顕著であり被害が大きい．

(2)　インフラセキュリティシステム

凍害に対するセキュリティシステムのフローを**図 1-4.9** に示す．また以下にそれぞれの項目について，考え方を示す．

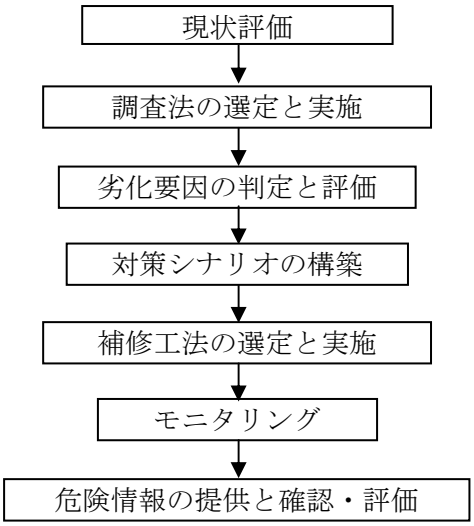


図 1-4.9　凍害対策選定フロー

1)　現状評価

凍害の現状評価するために以下の項目を調査する．

・　道路台帳，設計図書，点検記録
・　外気温上の凍結日の気象台データ
（日最高最低気温，日射量，雲量，風速）

2)　調査法の選定と実施

凍害は，日最低気温が凍結を起こす気温以下である箇所に発生するものでありこの気温が下がらない地区においては基本的に考えにくいものである．

凍害では，環境条件などの発生箇所における状況調査から被害部位調査，使用材料調査，被害範囲調査，被害状況調査を行い調査方法が選定される．調査法の種類を**表 1-4.9** に示す．

調査法の選定と実施にあたり着目する点は，生じている症状が凍害によるものであるかということと，それ以外の要因によるものであるかということと，複合的な要因であるかということの判定である．

3)　劣化要因の判定と評価

調査結果より，以下の項目について要因判定と評価を行う．

・　劣化区分（ひび割れ，スケーリング，ポップアウト界面水の膨張の区分）
・　劣化範囲によるグレード分け
・　落下による第三者被害の有無

劣化区分は，凍害の場合概ね**表 1-4.10** の状況である．

4)　シナリオの構築

構造物の部位・部材の劣化状況調査により損傷ランク，劣化進行速度等から現在どの劣化過程（潜伏期，進展期，加速期，劣化期）にあるかにより対策シナリオを構築する．

表 1-4.9　調査法の種類

調査区分	調査項目
状況調査	・環境条件（場所，日射，凍結融解の有無） ・水の供給（直接水がある，水が伝わってくる，結露がある，水が飛来する） ・コンクリート品質（打ち込み，締め固め，養生方法，期間） ・足場設置，高所作業車，橋梁点検車，点検用足場の利用
部位調査	ひび割れ，剥離：目視，写真撮影 スケーリング ポップアウト
材料調査	骨材の物理試験 コンクリート使用材料 耐凍害性
範囲調査	コンクリートの物性相違点評価 コンクリートのひび割れによる劣化度
被害状況調査	スケーリング深さ 凍害劣化深さ

表 1-4.10 劣化過程と劣化状態

劣化過程	劣化状態
潜伏期	劣化が顕在化しない状態
進展期	劣化が顕在化し，劣化が進行している状態
加速期	劣化の進行が大きくなる状態
劣化期	要求性能を満足できない状態

5)　補修・補強工法の選定

表 1-4.11　に工法選定の指針を示す．

6)　モニタリング

対策シナリオに従い，補修補強の有無にかかわらず構造物の監視計測をするモニタリングを実施する．モニタリングは，損傷箇所に於けるひび割れ履歴確認およびたたき検査による確認を行い，劣化進行状況区分の劣化度を確認することを行う．これを定期的に行い損傷の経年変化状況を確認する．

7)　危険情報の提供と確認評価

凍害の場合危険情報としては，最低温度情報であり水の供給や劣化範囲に対する情報提供となる．また，膨張圧や移動圧による劣化については，コンクリート製造時に於ける空気量に関する影響や水セメント比，骨材の材質や最大寸法・吸水率・細骨材率の影響，混和剤の種類も重要な要素となりこの情報についても管理資料として残す必要がある．混和剤の影響は，複雑であり定性的な評価も出来ない状態であるので，今後の実験検証によるところが大きい状態である．これらを参考として，劣化損傷発生時には，要因特定に於ける資料とすることが大切である．

表 1-4.11　凍害に対する補修・補強工法の選定

要求性能	潜伏期		進展期		加速期		劣化期	
	適用性	工法	適用性	工法	適用性	工法	適用性	工法
劣化印紙の遮断 劣化速度の抑制	◎	表面被覆･表面含浸処理(表面からの水分侵入防止)	◎	表面被覆（表面からの水分侵入防止）	△	表面被覆(表面からの水分侵入防止，剥落防止)	△	表面被覆（表面からの水分侵入防止，剥落防止）
			◎	ひび割れ補修(ひび割れからの水分侵入防止)	△	ひび割れ補修(ひび割れからの水分侵入防止)	△	ひび割れ補修（ひび割れからの水分侵入防止）
劣化因子の除去			○	断面修復(スケーリング,ポップアウト部の除去と断面修復)	◎	断面修復（スケーリング，ポップアウト部の除去と鉄筋の防食を目的とした断面修復)	◎	断面修復（スケーリング，ポップアウト部の除去と鉄筋の防食を目的とした断面修復)
耐荷力，変形性能の改善							◎	補強（FRP・鋼板接着巻立て
							○	打替え（劣化した部材のコンクリートによる打替え）
工法選定理由（要求性能）	凍結深さが小さく剛性変化，鉄筋腐食がない．凍害を受ける地域である．		凍結深さが大きく鉄筋腐食が始まる段階．		スケーリングやポップアウトだけでなく，鉄筋腐食に伴うひび割れ浮きなど比較的広い範囲の被害が出ている．		鉄筋腐食に伴う断面減少により耐荷力低下が懸念される．	

4.1.6　化学的侵食

(1)　劣化の形態

化学的侵食とは，侵食性のある化学的物質がコンクリート構造物に接触することによる溶解・劣化や，侵入した化学物質がセメント組成物質や内部鋼材と反応し，体積膨張によるひび割れやかぶりの剥離などを引き起こす劣化現象である．

橋梁構造物における化学的侵食は，温泉地帯や酸性河川などの限られた環境条件での発生が想定される．

(2) インフラセキュリティシステム

化学的侵食に対するインフラセキュリティシステムの流れを以下に示す．ここでは，モニタリングの実施とともに，補修補強によりセキュリティを確保する．

1)　シナリオの選定

まず調査により外観上のグレードを与え，劣化進行速度，深刻度にしたがって最適な最適な対策シナリオを選定する．**表 1-4.12** に一般的な構造物の外観上のグレードと対策について示す．また**表 1-4.13** に選択可能な対策シナリオを示す．

2) 補修補強工法の選定と実施

対策シナリオのうち，暫定補修，完全補修，補強＋補修が選択された場合，補修・補強の仕様を選定する．**表 1-4.14** に補修補強の仕様を示す．補修補強の仕様に従って，複数の工法の中から選定を行う．

表 1-4.12　構造物の外観上のグレードと対策[1)]

構造物の外観上のグレード	点検強化	補修	補強	修景	使用性回復	機能性向上	供用制限	解体撤去
状態Ⅰ（潜伏期前期）	○	(○)						
状態Ⅱ－１（潜伏期後期）	○	◎		◎				
状態Ⅱ－２（進展期）	◎	◎	○	◎	○	○		
状態Ⅲ－１（加速期前期）	◎	◎	◎	◎	◎	○		
状態Ⅲ－２（加速期後期）	◎	◎	◎	◎	◎	◎	○	
状態Ⅳ（劣化期）		○	◎	○	◎	◎	◎	◎

◎　：標準的な対策
○　：場合によっては考えられる対策
(○)　：予防的に実施される対策

表 1-4.13　対策シナリオ

対策シナリオ	対策内容
暫定補修	接触部分のみの修復 劣化因子の侵入防止（ひび割れ注入，撥水）
完全補修	接触部分以外も修復（修景含む） 劣化因子の侵入防止（ひび割れ注入，撥水）
補強＋補修	劣化部位の除去 反応生成物による膨張拘束
存置（継続調査）	(1)　概略調査の頻度増加　→(調査ｽﾊﾟﾝの短縮) (2)　詳細調査の頻度増加　→(調査ｽﾊﾟﾝの短縮) (3)　常時監視(ﾓﾆﾀﾘﾝｸﾞ)
無補修	次回点検まで放置
更新	部分解体撤去・再構築

表 1-4.14　補修・補強の仕様

仕様	内容
修景	美観の回復
保護層の修復	劣化部分の除去，修復
コンクリート断面修復	劣化部分の除去，修復
腐食鋼材の修復	劣化部分の除去，修復
使用性回復	新設時と同等に回復
機能性向上	新設時以上に向上

3）モニタリング

現在および将来にわたって著しい化学的侵食が懸念される場合，補修補強の有無にかかわらず，劣化状況を監視するモニタリングを実施する．**表 1-4.15** にモニタリングの仕様を示す．モニタリングは，常時監視することにより劣化速度の把握と性能低下までの期間を推定するために実施する．この仕様に従ってモニタリング手法の選択を実施する．

モニタリングの結果を評価するため，定性的状況に応じて５段階を設定する．評価ランクを**表 1-4.16** に示す．モニタリングした結果の構造物の状況から化学的侵食の段階を選定し，取るべき対策を実施する．

表 1-4.15　モニタリングの仕様（化学的侵食）

仕様	内容	備考
監視項目	テレビカメラによる接触部位の監視	変色，ひび割れ等の進行を観察する．
	光ﾌｧｲﾊﾞｰｾﾝｻｰによる膨張量の監視	反応生成物による膨張が想定される場合に実施する．
	劣化外力の強度測定 （温泉環境，酸性河川等）	水質，酸性度，腐食性ガス濃度，等．
監視期間	性能低下が顕在化するまで	劣化外力の種類・強度によって変わる．

表 1-4.16　モニタリングの結果評価

段階	モニタリング結果	対策	備考
①	劣化外力(温泉環境，酸性河川)の変動が日常的な値を超えたとき	構造物の監視強化 概略調査の実施	
②	接触部位の変化(変色，ひび割れ)が顕在化したとき	詳細調査の実施 劣化進行抑制対策の実施（保護，補修）	
③	詳細調査の結果，安全性･使用性において性能低下が顕在化したとき	補強による使用性回復あるいは機能性向上	
④	詳細調査の結果，剥離剥落の危険があり，第三者への影響が避けられないとき	剥離剥落対策の実施 補強による機能回復	供用制限あり
⑤	詳細調査の結果，機能回復が不可能なとき	部分撤去，取替え	供用制限あり

【参考文献】

1)　（社）日本コンクリート工学協会：コンクリート診断技術’05（基礎編），2005 年 3 月

4.2　鋼橋の劣化と対策

4.2.1　床版疲労損傷

鋼橋の劣化現象は，主に床版の疲労，鋼材の腐食，鋼材の疲労，ボルトの遅れ破壊などがある．これらのうち床版の疲労損傷については，損傷度の判定が目視によるところが大きく，定量的に評価することが難しい．そこで，比較的入手しやすい交通センサスにより累積の損傷度を推定することで，床版の疲労損傷を評価するセキュリティシステムを提案する．この手法は，センサスにより軸重の履歴を推定する方法であり，損傷度評価の精度が高いとはいえないが，橋梁管理のための一次スクリーニングとしての効果を期待できる．

4.2.2　セキュリティシステムの構築

床版の疲労については，実際に床版に載荷された軸重(P)と載荷回数(N)が大きく影響すると考えられる．ただし一般に，竣工当時から実際に床版に載荷された軸重(P)，および載荷回数(N)の載荷状況は明らかではない．

そこで，対象橋梁の実測モニタリングによる軸重測定，および既存交通量データの整理を行い，通過交通量の推定をすることによる床版の疲労評価フローを提案した．床版の疲労評価フローを**図 1-4.10** に示す．

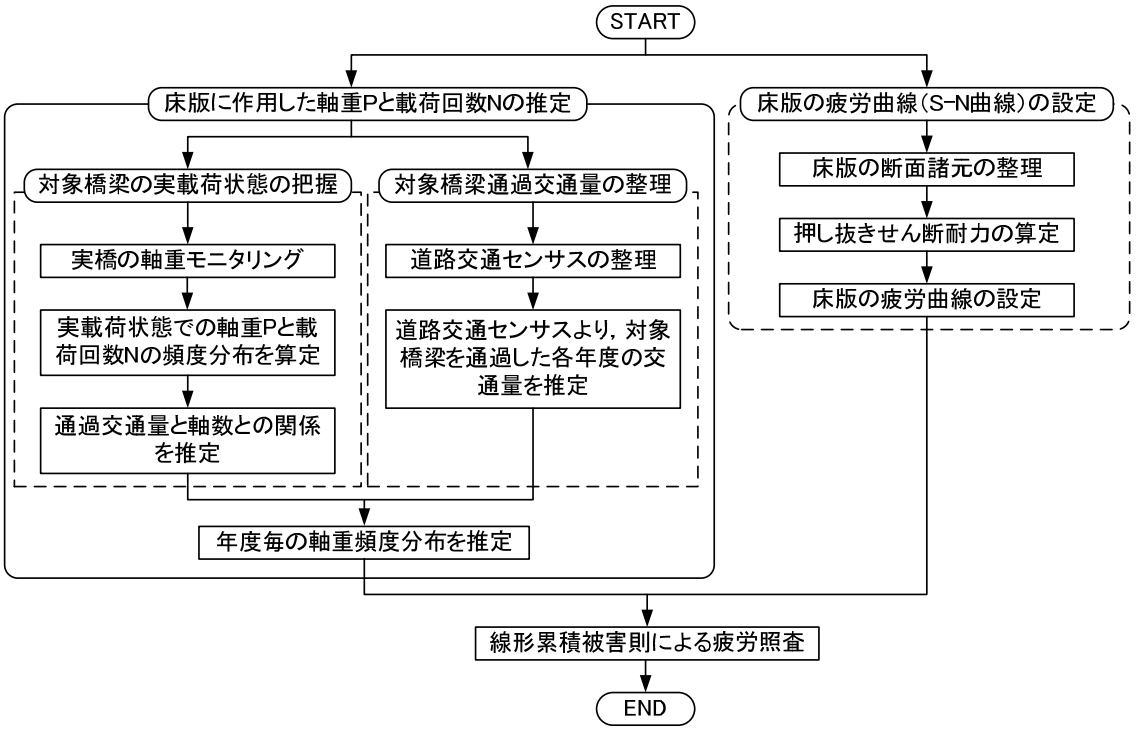


図 1-4.10 評価フロー

評価フローは大きく 4 つに分けられる．まず一つ目は交通量モニタリングであり，軸重推定手法などにより現在の軸重特性や交通量を把握する．これにより，交通台数と総軸数の関係，また軸重頻度分布の形状を得る．この頻度分布の形状を基本形として，過去の通過交通量に対比させて軸重の総履歴を推定することになる．

次に，対象となる橋梁の付近で行われた交通センサスの情報の整理を行う．対象地点の交通状況や，幹線道路の開通状況などを勘案し，対象橋梁を通過する交通量として適用できるデータを選定する．またデータが不足する場合は，交通流を想定して付近のデータか

ら推定することを行う．これにより，開通から現在までの総通過台数を得る．

次に，モニタリングで得られた通過車両の平均軸数と，センサスより得られた総通過台数を掛け合わせることで，橋梁上を通過した総軸数 N1 を推定する．さらに，常に同じ頻度分布形状であると仮定し，モニタリングで得られた頻度分布の総軸数 n が，過去の総軸数 N1 となるよう，それぞれの要素を N1 /n 倍することで，開通から現在までの軸重頻度分布とみなす．

最後に，床版の疲労曲線を想定し，得られた軸重頻度分布から，疲労損傷度を算定する．

4.2.3 遠隔モニタリングシステム

鋼橋に対する遠隔モニタリングシステムの詳細は，第 4 編実地モニタリングおよび実装システムを参照のこと．

5　今後の課題と展望

既設橋梁の延命化，とりわけ最適延命化方策の策定に関する研究を進めるに際しては，以下に示す事項の検討と研究が必要である．

引き続き行うべき課題：

- 光ファイバ等を活用した計測手法による鋼橋の遠隔自動モニタリングを継続し、荷重載荷状態を把握するとともにインフラ･セキュリティ･システムを実稼動させる．危険情報の収集や当初設定している閾値の位置づけ・的確性向上を図るとともに，疲労劣化に関する健全度や補修補強効果の評価・検証を行う．また，機動的点検や戦略的監視体制の検討を進めるとともに管理者等との連携を進め，より適切で効率的な維持管理手法の技術的提案を行う．
- 補修補強工事等における橋梁の諸数値を計測し、補修補強効果の確認と検証を継続的に行う．劣化予測，耐久性・耐久期間の判断材料として具体を提供できる．
- 延命化を図るために行う計測調査や補修補強等に寄与する新工法新技術の調査と適用、および実用化研究を行う．特に異業種異分野における先端的な計測機器の転用や応用により非破壊・非接触の新しい計測手法や判断材料の提供が行える可能性があり，調査研究を進める．また，従来手法の中でも各種装置を同時複合的に用いることや，より自動化・ロボット化の要素を取り入れることで精度向上が図れたり，即応性・利便性，道路交通への負荷軽減を果たせたりすることが期待できるため，引き続き調査研究を行う．
- これまでに構築した調査法選定システム・工法選定システムの高度化，判定機能の追加と洗練を行う．これにより上記選定システムの利活用の範囲や用途が広がることになり実用性が向上する．

研究テーマ：

- 橋梁の各種劣化要因に着目し､適切な性能評価を行うとともに延命化方策・シナリオ（案）の研究と最適な延命化方策を策定する技術・手法の提案を行うこと．
- 橋梁の荷重載荷状態や各種要因による劣化状態を適切に把握するとともにその劣化予測を行うこと．
- 当初設計段階における｢維持管理を考慮した設計｣に関する技術・手法の提案を行うこと．
- 道路管理者や利用者等のインフラ･リスク･リテラシィの向上に寄与するべく，技術の普及・講習に供する技術登録やマニュアル等の作成を進めるとともに，適切な情報交流の場づくりを行うこと．

第 2 編　調査計測技術

1　概要　2-1

2　調査・計測技術の選定　2-1
2.1　調査・計測技術の選定　2-1
2.2　コンクリート構造物の各劣化機構に応じた調査・計測技術の選定　2-1
2.2.1　共通　2-1
2.2.2　塩害に対する調査・計測技術　2-2
2.2.3　アルカリ骨材反応に対する調査・計測技術　2-3
2.2.4　RC 床版の疲労に対する調査・計測技術　2-3
2.2.5　中性化に対する調査・計測技術　2-4
2.2.6　凍害に対する調査・計測技術　2-5
2.2.7　化学的侵食に対する調査・計測技術　2-5
2.2.8　PC 鋼材関連の劣化に対する調査・計測技術　2-5
2.3　鋼構造物の劣化に対する調査・計測技術　2-6
2.3.1　腐食に対する調査・計測技術　2-6
2.3.2　亀裂に対する調査・計測技術　2-8

3　調査・計測技術の現状と課題　2-9
3.1　調査・計測技術の現状　2-9
3.2　調査・計測技術の今後の可能性　2-9
3.2.1　技術開発の方向性　2-9
3.3　補修・補強後のモニタリング　2-9
3.3.1　概要　2-9
3.3.2　モニタリングの目的と位置付け　2-9
3.3.3　遠隔モニタリングシステム　2-10

1　概要

既存構造物の維持管理を適切に行う上で，調査・計測技術は必要不可欠なものである．既存構造物の損傷・劣化を発見しその劣化機構を推定した上で，劣化予測および性能評価を行い，その対策を講じるといった一連の維持管理フローにおいて，必要かつ重要な情報・データは各種点検において得られるものである．点検の種類・方法[1)]（初期点検，日常点検，定期点検，詳細点検，臨時点検）に応じた調査項目・計測技術があり，維持管理の各段階において必要となるデータを得るためには，調査・計測技術の選定が重要となる．近年，国内における調査・計測技術の開発，発展は目覚ましいものがあり，多種，多様な技術が実用化されている．それらの調査・計測技術を整理し選定のフローを確立することは重要な課題であると認識されている．

本編では既存構造物の調査・計測技術の現状とその選定方法について述べるものである．コンクリート構造物の各種劣化機構に応じた調査・計測技術および鋼構造物の劣化に対する調査・計測技術に関する選定について詳述するとともに，今後の課題，可能性についても言及する．

2　調査・計測技術の選定

2.1　調査・計測技術の選定

橋梁構造物の維持管理に関する調査・計測は一般に初期点検・日常点検，定期点検，詳細点検，臨時点検の中で実施される．初期点検・日常点検は，劣化，損傷の早期発見を目的とした離れた場所からの目視を主体とした点検であり，デジタルカメラなど，変状を比較的広範囲の画像として捉えることのできる技術が有効である．定期点検では，橋梁の劣化，損傷，初期欠陥の有無や程度の把握を目的とした近接目視を基本としながら，推定される劣化機構を対象とした非破壊・微破壊検査等の調査・計測技術が主体となる．詳細点検では，主として劣化機構の明確化と進行度の把握，劣化予測，対策立案のためのデータ収集を目的として行うものであり，目視とともに各劣化機構に基づく点検や分析を，より詳細に実施できる技術が必要となる．

このように，調査・計測にあたっては，多数ある調査・計測技術の中から，点検のレベルや想定される劣化機構等に応じた適切な方法選定が必要となる．

2.2　コンクリート構造物の劣化機構に応じた調査・計測技術の選定

2.2.1　共通

一般に，コンクリート構造物点検の第一段階は変状の有無と状況の把握が主体となる．変状が認められた場合，それが初期欠陥，劣化，損傷のどれに該当するか，またそれが劣化とされた場合にはひび割れ，剥離・剥落，コンクリートの変色，鉄筋の露出，錆汁，遊離石灰等の有無や程度，特徴を把握するための調査を行い，劣化機構の推定を行う．この段階では，あくまでも目視による外観調査が基本となるが，併用的に活用できる汎用的な調査技術として，デジタルカメラを用いたものと赤外線サーモグラフィーを用いたものがある．

(1) 目視調査

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況やコンクリート構造物全体の変形状況，構造物周辺の環境状況等を目視観察や簡単な器具等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．

目視調査で観察すべきコンクリート表面の損傷と調査項目，調査方法は**表2-2.1**に示すとおりであり，調査にあたっては損傷の位置や規模，構造物の変形状況を計測する簡易な測定器具，損傷を記録するカメラ，浮き，剥離を把握するハンマーなどを携帯し損傷状況を

把握する.

表2-2.1　コンクリート構造物の目視調査方法[2)]

損傷の種類	調査方法
ひび割れ	・目視観察によるひび割れの発生方向,本数の把握・記録 ・ひび割れスケール等によるひび割れ幅の測定』記録 ・スケール等によるひび割れ長さの測定・記録 ・ひび割れに触れて浮き上がり,段差等の把握・記録 ・ひび割れ周囲の灯音による浮き・剥離の把握・記録 ・ひび割れからの錆汁溶出箇所の把握・記録
浮き・剥離きび剥落 鉄筋露出,錆汁の溶出 豆板,遊離石灰,変色 漏水,滞水 補修跡	・目視観察による損傷位置,損傷箇所数の把握・記録 ・損傷周囲の打音による浮き・剥離の把握・記録 ・スケール等による損傷の寸法測定・記録
異常音 異常振動	・音源や振動位置を目視観察等で把握・記録
変形 沈下,移動,傾斜	・目視観察・記録 ・スケールや下げ振り等による測定・記録

(2)　デジタルカメラ

近年のデジタルカメラ技術と画像処理ソフトの進歩により，デジタルカメラは目視点検の記録手段として必要不可欠な器材となりつつある.

(3)　赤外線サーモグラフィー

赤外線サーモグラフィーは，構造物から離れた位置より，非接触で広範囲にわたり短時間に計測ができ，コンクリートの浮き，剥離，ジャンカ，内部空洞を検出するのに極めて有効な調査・計測技術である

2.2.2　塩害に対する調査・計測技術

塩害に対する調査では，表面から鋼材近傍，さらにその内部までの塩化物イオン濃度分布や鋼材の腐食状態を把握することが重要になる．また，維持管理計画を立案する上では，現状の塩化物イオン濃度分布より，将来の濃度分布や鋼材の腐食の程度を推定することが必要となる.

(1)　環境条件の調査

塩害に対する環境条件の調査は，構造物の立地条件に関して，飛来塩分や凍結防止剤等の外来塩分の供給条件を調査する必要がある．直接海水の影響を受ける海中環境，干満環境，飛沫環境のような海洋環境では，多量の塩化物イオンがコンクリート中に浸透する．また直接海水の影響を受けなくとも海岸線に近距離にある構造物では風によって運ばれてきた塩分がコンクリート表面に付着し，浸透する場合がある．飛来塩分量を計測する方法は，統一されたものはないが，ガーゼ法付，着塩分拭取法，土研式塩分補修器法などがある.

(2)　塩化物イオン含有量試験

一般にコンクリート中の塩化物イオン量は，コアを採取し，そのコアから試料を作成して，化学分析される．化学分析の方法としては，日本コンクリート工学協会（JCI）基準[3)]のJCI－SC4「硬化コンクリート中に含まれる塩分の分析方法」が一般的である.

(3)　表面分析法

EPMAの略称で知られる，波長分散型X線分光器（WDS）やエネルギー分散型X線分光器（EDS）を搭載した電子プローブマイクロアナライザー（Electron Probe Micro Analyzer）による方法が一般的である.

(4)　塩化物イオン浸透解析

塩害により劣化した構造物について，維持管理計画の策定や補修設計を行う場合，現状

の塩素イオンの浸透状況のほか，現状で放置した場合あるいは補修を行った場合，塩素イオンの濃度分布がどのように推移するかを把握することは極めて重要な事項である．

2.2.3 アルカリ骨材反応（ASR）に対する調査・計測技術

ASRに関する調査項目は，ひび割れ，変色，ゲルの滲出などの目視観察，現地で構造物を対象として行う各種計測と構造物から採取したコアによる各種室内試験からなる．

(1) 構造物から採取したコアによる各種試験

ASRによる劣化の疑いがある構造物の判定に重要な情報を得るためには，構造物の損傷度が最も適切に評価できる箇所を選んで，コア採取をする必要がある．現在のところ，非破壊検査ではASRの判定をすることは不可能であるため，構造物からコア採取をする微破壊を伴う手法が最も有効となる．

① 骨材のアルカリシリカ反応性

骨材のアルカリシリカ反応性試験方法には，化学法とモルタルバー法によって判定するのが一般的である．

② 残存膨張量

ASRによる劣化が懸念される構造物におけるASRの劣化進行予測は，採取したコアの残存膨張量で推定するのが原則とされている．我が国では，コンクリート中のアルカリシリカ反応性の残存膨張性を評価する試験として，温度40℃，相対湿度100％の湿気箱にて実施する方法（JCI-DD2）がよく用いられる．その他の方法として，カナダ法，デンマーク法などがある．

③ 骨材の岩種および反応性鉱物の種類

偏光顕微鏡観察法では，使用された骨材の岩種・鉱物の種類と量，セメント硬化体の様子，反応生成物などが観察できる．粉末Ｘ線回折試験では，コンクリート中の粗骨材とセメント硬化体を構成する鉱物（クリストバライトとトリジマイトの同定）の診断が可能となる．また，走査型電子顕微鏡観察（SEM-EDXA）を用いて，アルカリシリカゲルであるか否かの判定もできる．

(2) 非破壊検査

ASRによる劣化を受けた構造物の維持管理においては，コンクリート断面内部の劣化進行や鉄筋破断の有無を的確に把握する必要がある．現在，断面内部の状況を調査する場合は，採取したコアを用いる室内試験や構造物を直接はつりとる調査などの微破壊をともなう手法を用いるのが一般的である．しかし，供用している構造物を痛める手法は維持管理上では有効でない場合も考えられことから，非破壊検査手法を用いた診断技術の確立が強く望まれている．

① 超音波法

超音波法は，コンクリート断面内部の劣化状況を評価する非破壊点検手法として用いられる．ASR劣化によりひび割れが生じると超音波伝播速度が低下する傾向が見られる．超音波伝播速度を測定することにより，コンクリート内部の劣化を定性的ではあるが把握することができる．また，定量的評価に関する研究として，超音波法を用いることによりASR劣化したコンクリートの物性値（圧縮強度，弾性係数）を予測する研究も進められている[4)5)]．

② 非破壊による鉄筋破断の調査

ASRによる劣化を受けたコンクリート構造物における鉄筋破断は，断面内部で生じているため，構造物を一部破壊するはつり調査意外に有効な方法はないと考えられていた．近年の研究において超音波法および電磁誘導法を応用した鉄筋破断検出技術が開発され，実構造物での検証が行われている[8)9)]．

2.2.4 RC床版の疲労に対する調査・計測技術

RC 床版の調査項目は，日常点検，定期点検および詳細点検のいずれにおいても目視による外観変状の観察が主体となる．外観の変状以外のひび割れの挙動，たわみ・変位挙動，

床版対荷特性等については詳細点検で行うものである．過去の資料がない場合は，設計断面諸量を現場試験から特定する必要がある．コンクリート強度，床版厚さ，鉄筋の背筋量などの設計断面諸量の特定と併せて，現地での交通特性を知ることは，その床版の疲労寿命を予測する上で必要不可欠である．

(1)　ひび割れ挙動

ひび割れの進展，ひび割れ密度，ひび割れ幅の調査は目視が基本となるが，遠隔操作が可能なデジタルカメラを用いた画像処理による手法も近年開発され実用化されている．直接ひび割れ幅，開閉挙動を計測する手法としてπ型ゲージを用いる計測方法が一般的である．ひび割れ深さについては，超音波法を用いて超音波伝播時間を測定することにより求めることができる．

(2)　設計断面諸量

設計断面諸量の特定は，床版疲労寿命を予測する上で必須調査項目である．コンクリート強度は，非破壊試験ではシュミットハンマー等を用いる反発硬度法が有効であるが，より精度を必要とするならば，既存ＲＣ床版より採取したコアを用いて力学的試験を実施することが望ましい．鉄筋の配筋量，床版厚は電磁波計測法等をもちいられることが一般的である．

(3)　耐荷性

既存RC床版の現時点での耐荷特性を把握するため，あるいは劣化予測を含め疲労寿命を推定するためには，現地にて載荷試験を実施する場合がある．荷重載荷を行い，π型ゲージ，ひずみゲージ等を用いてたわみ・変位量，コンクリートひずみ，鉄筋ひずみ等を測定する．得られたデータから床版の耐荷特性および床版の劣化の進行状況，疲労寿命等を推定することができる．また，直接載荷試験を実施することなく，実交通に対する床版の挙動を常時把握するモニタリングシステムは維持管理に対して非常に有効な手段と言える．

近年，光ファイバを用いてコンクリートのひずみを遠隔モニタリングすることにより，床版劣化の進行状況把握するシステムが各方面で積極的に開発されている．動的計測が可能な光ファイバを用いるシステム，光ファイバーセンサによる面的ひずみの分布を測定するシステム等がある．

2.2.5 中性化に対する調査・計測技術

コンクリート構造物における中性化は，大気中の二酸化炭素がコンクリートに侵入して炭酸化反応を起こすことによりコンクリート細孔中のアルカリ溶液の pH を低下させる現象である．pH の低下に伴い RC 構造物や PC 構造物中の鉄筋や PC 鋼材の不動態皮膜が消失し，鋼材が腐食・膨張する．さらに鋼材の膨張により，コンクリートにひび割れを発生させる．ひび割れの存在により鋼材に供給される酸素等の腐食因子の量が増大しさらに腐食が進展し，コンクリートに剥離や剥落を生じさせる．また鋼材の断面積の減少により，構造物の耐荷性能も低下する．そのため中性化に対する調査では，中性化深さや鋼材のかぶり，腐食状況を把握することが重要となる．

(1)　環境条件の調査

中性化に対する環境条件の調査は，気象条件として，気温・湿度，降雨頻度・量，日射条件の他に，酸性ガスの種類と濃度，立地条件として土壌に接している場合は，酸性物質の有無・量に関して調査する必要がある．また酸素や水等の腐食因子の供給条件についても確認しておく必要がある．

(2)　中性化深さ試験

中性化深さ試験は，JIS A 1152「コンクリート中の中性化深さの測定方法」に規定されているフェノールフタレインの1%エタノール溶液を噴霧する方法が一般的である．その他，JIS A 1152同様にフェノールフタレイン法による方法であるが試料としてドリル削孔粉を用いる方法，採取コアの試験片を用いて行う，熱分析試験やｐＨ測定法などがある．

(3)　表面分析法

中性化における表面分析はEPMAが一般的に使用される．

2.2.6　凍害に対する調査・計測技術

凍害に対する調査では，外観や構造物が設置されている地域の他に，コンクリートの品質や気泡や細孔の分布，気温や日射といった環境条件，水の供給条件，鉄筋の腐食状態等に着目する必要がある．

(1)　環境条件の調査

凍害に対する環境条件の調査は，気象条件として，気温・湿度，降雨頻度・量，日射条件の他に，凍結融解回数や水の供給条件，立地条件として土壌に接している場合は，土壌中の含水率やコンクリートの含水率を調査する必要がある．また，地域性に関して，凍害危険度の分布図[8)]における凍害危険度も確認しておく必要がある．

(2)　反発度法

凍害は，スケーリング，ポップアウトや微細ひび割れが表面から生じ，劣化が進行していく劣化現象であるので，凍害を受けた構造物のコンクリート表面の反発硬度も変化していきやすい．そのため，反発硬度法による強度推定及び強度分布の推定は，凍害の劣化の進行，損傷の範囲を確認するための有効な調査手法のひとつである．

(3)　超音波伝播速度

コンクリートが凍害により劣化すると超音波伝播速度が遅くなる．その性質を利用すると，深さ毎の超音波伝播速度を測定すれば，凍害深さや凍害の進行を推定することができる．

(4)　細孔径分布の測定

コンクリートが凍結融解の影響を受けると，細孔径分布が変化することが知られている．そのため，深さ毎の細孔径分布の経時変化を把握することや，同構造物の中で細孔径分布を比較することにより，凍害の損傷深さ，凍害の劣化の進行，損傷の範囲を推定することができる．測定方法としては水銀圧入法や気体吸着法が一般的である．

(5)　気泡分布の測定

練混ぜ時に混入した空気は硬化後にも気泡という形で硬化コンクリートにも残留する．耐凍害性に関しては，水分移動距離と相関のある気泡間隔係数によって説明が行われ，そのため，空気量が一定であるならば，気泡が小さくその間隔が小さくなるほど凍害に関しては有利に働くということがいえる．気泡間隔係数は200~250μm程度であれば，そのコンクリートは十分な耐凍害性を有しているといわれる．硬化コンクリートの気泡組織の測定方法はASTM C 457-98 [9)]にその詳細が規定されている．

2.2.7　化学的侵食に対する調査・計測技術

(1)　環境条件の調査

化学的腐食を考慮した場合，コンクリートが接触する侵食溶液の種類等は極めて重要である．コンクリートの化学的侵食は特殊な酸性溶液がコンクリート表面に接触することによって発生する．このような酸性の環境条件として，酸性雨・酸性霧が比較的多く発生する地域，酸性度の高い温泉水を湧出する温泉地域，酸性度の高い排水を扱っている下水処理施設，などが挙げられる．このような特殊な環境条件下において供用されているコンクリート構造物は化学的侵食が発生しやすいと判断される．

(2)　化学成分組成

コンクリートの化学成分組成を調査し，酸の侵食深さなどを把握する必要がある．分析には電子線マイクロアナライザー（EPMA法）が一般的に用いられる．

2.2.8　PC鋼材関連の劣化に対する調査・計測技術

(1)　グラウト充填性調査

グラウト充填状況の検測は通常，以下の非破壊検査による確認方法が主にNEXCOなどで採用されている．

① マルチパスアレイダによる電磁波レーダ法[10)]

マルチパスアレイレーダ（以下，MPA レーダと称す）は，レーダから発信される電磁波の「電気的特性の異なる物質の境界面で反射する特性」を利用し，コンクリート内の鉄筋・空洞などを検出するレーダ探査の原理から，シース内グラウト充填不足により発生した「空隙」からの反射を捉え，グラウト充填確認・充填不足箇所の調査を行うものである．

②広帯域超音波による超音波深傷法

コンクリート上に探触子を配置し，シースからの反射波を利用してＰＣケーブル内のグラウト検査を行う．空のシースは充填シースに比べ，反射波の強度が大きくなる性質を利用するものである．

(2) PC鋼材の破断調査

PC 鋼材の破断調査方法は，基本的に鉄筋の破断調査方法と同様である．主な方法として，超音波探触子法や衝撃弾性波法などがある．

(3) PC鋼材定着部損傷の調査

横締めPC鋼材定着部の後埋めコンクリートが剥離などを生じた場合，雨水が浸入し，PC鋼材の耐久性が著しく低下する．通常，PC鋼材定着部の損傷は目視観察か打音法などによって確認する．

2.3. 鋼構造物の劣化に対する調査・計測技術

2.3.1 腐食に対する調査・計測技術

鉄の腐食は湿食と乾食に大別されるが，鋼道路橋における腐食は，主として湿食であり，また，その湿食は，全面腐食と局部腐食に大別される．全面腐食は，金属表面状態が均一で均質な環境にさらされている場合に生じ，全面が均一に腐食する現象であり，局部腐食は，金属表面の状態の不均一あるいは環境の不均一により腐食が局部に集中して生じる現象であり，一般に，アノードとなる腐食部分が固定されるため，腐食速度は全面腐食と比較して著しく大きい．このため，一般に構造物の性能に腐食が問題となるのは局部腐食である．また，飛来塩分量などの環境条件や，地形条件あるいは，構造物において滞水しやすい部位などのディテールによって，その進行速度は左右され，除々に進行する破壊現象であるため，早期に発見し適切な補修または補強を行うことが重要である．腐食は局部的な減肉による断面欠損を生じる損傷であり，検出を行うためには，橋梁の各部材に接近することが必要となる．よって，定期的な点検の他に塗装塗替え時やその他の補強工事の際に設置される作業足場を利用して，詳細点検を実施することも多くみられる．

(1) 母材の調査

母材の外観や残存板厚をを調査することにより，腐食の進展状況を判断する．一般的にはノッチなどの切り欠き傷が生じやすい箇所や，滞水しやすい箇所，飛来塩分などがこもり安い風通しの悪い狭隘部などに着目する．

① 外観調査

母材の劣化状況の概要を把握する上で，外観調査が必要不可欠であり，代表的なものとして，目視点検，接写写真， セロファンテープ試験，色見本による方法などがある．

② 残存板厚計測

残存板厚の計測方法として，マイクロメータによる計測，超音波厚み計による方法がある．計測精度は，マイクロメータが0.01㎜程度，超音波厚み計が0.1㎜程度であるが，実用的には鋼材の計測対象点の片側面のみ平滑化すれば計測が可能な超音波膜厚計による方法が一般的である．

超音波膜厚計による方法は，あらかじめ板厚計測する部位をモニター点として設定し，経年変化を記録する．重要なことは，橋梁建設時あるいは，板厚計測開始時点の初期値を記録しておくことである．

また近年，耐候性鋼材の残存板厚を予測する手法として，桁内側環境での飛来塩分量

0.05mdd以下での暴露試験結果に基づく回帰予測による残存板厚予測法なども提案[2]されており，後述する耐候性鋼材の50年後の最大板厚減少量などの予測に用いられつつある．

(2)　塗膜劣化度調査[11]（塗装鋼材の場合）

鋼橋の塗膜調査で最も重要視されるのは目視調査であるが，この結果を定量的に判断するための裏付け，または説明資料として，各種の計器類を用いた測定が行われている．

①　碁盤目・クロスカットテープ付着試験

碁盤目状もしくはクロスカットに素地に達するキズを入れた塗膜を，セロハンテープの粘着力を用いて強制はく離することにより，塗膜の素地への付着性および塗膜の相関付着性を評価する方法である．

②　引張付着試験（アドヒージョンテスト）

塗膜の付着力（垂直引張力）を具体的な数字で示すことができる試験であり，塗膜面に接着剤によって取り付けた端子を垂直に引っ張ることによって，塗膜の付着力を測定する方法である．

③　インピーダンス測定

ポータブル型インピーダンスブリッジを用いた測定器により，周波数ごとの交流抵抗値と電気容量値を測定し，それらの経時変化量から塗膜劣化度を評価する方法である．塗膜の劣化により塗膜下に水分が侵入した場合，抵抗値の減少と容量値の急増が生じることで，劣化を判定できる．

④　色差測定，光沢測定

色差測定は，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行い，塗装変退色の定量化を行う方法である．

また，一般に塗膜の表面の劣化が進むにつれて平滑度合いが失われていき，鏡面光沢度は低下する．このため，塗装の光沢の低下においては，携帯用光沢計を用いて60度鏡面光沢度の経時的な変化あるいは劣化状況を評価する．

(3)　さび調査（耐候性鋼材の場合）

①　さび厚計測

さび厚さの指標として，電磁膜厚計によって計測した値を用いる．本方法は，厳密なさび厚さを求める目的で実施するものではなく，さびの状態を特定するために実施するものであり，これによって得られる値を指標値とするものである．さび層の厚さについては，地鉄が強磁性体であるのに対しさび層の主体は反強磁性体であるとことから，塗膜厚を計測するのに用いられる電磁膜厚計を用いることが可能である．

②　さびの構造調査

さびの構造については，さびの組成，さび層のイオン透過抵抗，電気化学的電位または地鉄反応が起こる活性点の面密度等が指標となる．さびの構造については，a)X線回折，ラマン分光，メスバウアー分光等を使用してさび層の組成そのものを分析する手法，b)電気化学的特性から保護性さびの生成状態を推定する手法（イオン透過抵抗，電位など），c)さびの緻密性をフェロキシル試験を適用し化学反応により推定する手法などがある．

(4)　地域環境の調査

実橋が設置される環境の調査を主として，飛来塩分量あるいは鋼材表面の付着塩分量に着目して測定し，これにより橋梁が腐食に対してどのような状況に置かれているかの情報を得ることができる．一般に，橋梁の建設段階において，耐候性鋼材の適用可否，さらに耐候性鋼材の無塗装仕様の適用可否を選定するため実施される．

①　飛来塩分量測定

飛来塩分量測定方法として，土研式タンク法，ウェットキャンドル法，ドライガーゼ法（JIS　Z2381）等が一般的である．

②　鋼材表面付着塩分測定

耐候性鋼材の表面に付着した塩分量を測定する方法は確立されていないが，建設当初の初期のさび程度では，塗装膜表面の付着塩分測定法で使用される「拭き取り法」による方

法が適用できる．その他，ガーゼ拭き取り塩素イオン検知管法，ブレッセル法，電導度法などがある．

2.3.2　亀裂に対する調査・計測技術

鋼橋における疲労亀裂は，部材の溶接継手部や部材同士の接合部などの極めて局部的な箇所に発生する．すみ肉溶接の止端部，あるいはルート部から発生することが多い．また，応力や変形の繰返しに伴い，除々に進行する破壊現象であるため，早期に発見し適切な補修または補強を行うことが重要である．疲労亀裂は微小な損傷であり，検出を行うためには，橋梁の各部材に接近することが必要となる．よって，定期的な点検の他に塗装塗替え時やその他の補強工事の際に設置される作業足場を利用して，詳細点検を実施することも多くみられる．

(1)　亀裂性状

亀裂の発生始点，長さを調査することにより，亀裂の進展状況を判断する．一般的には溶接部などの部材同士の接合部に着目する．

①　目視点検

明視距離から直接部材表面を肉眼で観察する方法である．疲労亀裂のような開口幅が小さい亀裂の検出は容易ではなく，熟練者による点検が要求される．亀裂が塗膜を破った後に表面に発生する錆汁が，亀裂検出における最も有効な判断指標となるが，粉塵の堆積により錆汁が覆い隠されていることが多く，注意深く粉塵を取り去ることが必要である．

②　渦流探傷試験

鋼材などの導電性材料に交流電流を流したコイルを近付け，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亀裂を検出する方法である．

③　磁粉探傷試験

対象部を磁化し，強磁性体の微粉末を付着させることにより，その付着状況から視覚的に亀裂の有無，表面上の亀裂長さを調査する方法である．

④　浸透探傷試験

亀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てくることを利用して，視覚的に亀裂の検出を行う．この方法では部材表面に発生している亀裂のみが検出可能である．

⑤　超音波探傷試験

超音波が金属などの物体中を一定方向にのみ伝播し，異なる種類の物体に当たると反射するという特性を利用して亀裂欠陥を検出する方法である．

(2)　変形量（たわみ量）

対傾構や横桁の主桁との取付部に発生する疲労亀裂の原因として，荷重分配作用による主桁間のたわみ差が上げられることが多い．このたわみ差を計測することにより，対傾構や横桁の取付部に発生する二次応力についての情報を得ることができる．

また，主桁については，亀裂に起因する部材の断面減少による剛性の低下から過大な変形を誘発することが考えられるため，主桁のたわみ量を計測することにより橋梁の剛性の変化に関する情報を得ることができる．

①　接触式変位計

桁下に不動点を設けて変位計を設置する方法である．

②　光学式変位計

山間部の谷間に架けられた橋梁や，桁下が河川である場合は不動点を設けることができない．このような場合は橋梁にターゲットを設置し，測量機器から光波やレーザーをターゲットに当てることにより変形量を測定する方法を用いることが多い．

(3)発生応力測定

実橋の構造的に代表する応力を測定することにより，設計計算応力との差異を確認することができる．これにより橋梁が疲労に対してどのような状況に置かれているかの情報を

得ることができる.

3. 調査・計測技術の現状と課題

3.1 調査・計測技術の現状

我が国の土木構造物においては，従来，各種の調査・計測技術が活用されてきた．例えば，橋梁の安全性確保のためのたわみ計測，コンクリートの圧縮強度を推定するためのテストハンマーによる方法などが挙げられる．しかし，従来の調査・計測技術だけではまだ不十分な点もあり，精度や操作の簡便性，さらに現地に行く必要がない遠隔モニタリング技術の充実などが求められていた．最近の電子機器関係の発展によって，土木構造物関係の調査・計測技術にもそれらが十分応用できるようになり，調査・計測技術は一段と飛躍したと考えて良い.

3.2 調査・計測技術の今後の可能性

3.2.1 技術開発の方向性

橋梁の維持管理は，点検ならびに調査結果，変状に対する健全度評価に至る経緯の中で人力に頼る部分が大半を占めている．この人力の部分においては，個人差が出てしまう場合も多いことから，IT 技術の活用や計測センサの活用などが急速に進展している.

現実の点検業務（目視検査，打音検査等）は一般的には足場や高所作業車を用いた人力作業であることが多く，次に示す問題解決を目的に新技術の開発が行われている.

①調査・計測の高速化，**②調査・計測の省人化**，**③調査・計測の標準化**，
④調査・計測技術の多機能化，**⑤調査・計測**技術の信頼性向上，
⑥調査･計測結果のビジュアル化，電子化

3.3 補修・補強後のモニタリング

3.3.1 概要

橋梁構造物における点検・調査・計測は，橋梁構造物の健全度評価や劣化予測から対策工事に至る一連のアクションに結びつけることを前提として行う必要がある．一般に，橋梁構造物は完成後の改築が困難であるため，長期間にわたり供用する必要があり，その役割は重要なものとなっている．点検・調査・計測において必要なことは，補修時期の判定や対策工設計に必要となる詳細な情報を得ることである．これには，できる限り定量的なデータを得るための手段が用いられる．また，対策工を実施した後も，必要に応じてその効果の確認のための計測等を一定期間ごとに継続して実施する必要がある.

3.3.2 モニタリングの目的と位置付け

橋梁構造物に発生する異常の予知・予測では，①発生位置・②形態および規模・③発生時期の3要素が必要である．このうち，位置，形態および規模は橋梁の構造や補修履歴から判断してある程度の想定が可能である．また，発生時期に関しては，予測式等が知られているが，適用性については，計測結果の蓄積によって検証を行う必要があり，今後の課題となっている.このようにモニタリングシステムを導入するにあたっては，上記のような予知・予測の現状を踏まえ，位置付けと目的を明確に定めることが重要である.

(1) 目的

橋梁構造物に発生する異常予知・予測を目指し，異常箇所の抽出と，橋梁危険箇所の監視(将来的には時期の予測を目標とする)の二つをモニタリングの目的とする.なお，状況により，対策済みの箇所で対策効果を確認するためにモニタリングを行う場合もある.

(2) 位置付け

橋梁におけるモニタリングとは，管理の基本である目視点検を補間・支援し，管理の高度化・効率化を図るための管理手法である.

(3)　常時遠隔モニタリングの目的と位置付け

橋梁のモニタリングを遠隔で行う主な利点として，計測作業の効率化が挙げられる．すなわち，作業員が現地で行う計測作業を必要としないため，人件費の削減が行える上，モニタリングの時期を自由に設定することができる．さらに，作業に伴う危険性の回避や交通への干渉も少ない．

また常時モニタリングの目的は，動的要因である荷重特性の把握，通常点検期間外での異常や変状の把握である．荷重特性の把握に関しては，鋼橋のコンクリート床版や桁端部および隅角部等で発生する疲労損傷の評価に必要不可欠である．ここで得られる通過車両の荷重や頻度または応力振幅により，疲労損傷度を評価することができる．また荷重特性そのものに関しても，動的増幅率を正確に把握することで，衝撃係数を合理的に設定することができる．また常時モニタリングの実施により，供用時における損傷の早期検知，点検による損傷の見落とし防止，検査しにくい箇所の点検，さらには災害発生時の安全性照査なども可能である．さらに，常時モニタリングの結果と点検結果を整理することで，実施項目の合理的な選択と，効率的な維持管理が実現できる．

3.3.3　遠隔モニタリングシステム

(1)　システム構成

橋梁におけるモニタリングシステムは，現地端末と監視事務所端末とその間で計測データ等を授受するための通信システムによって構成され，現地監視と遠隔監視の２つのシステムに区分される．しかし，通信ネットワークの利点を充分生かしたシステムは遠隔監視システムであり，近年の通信方式の大容量（高速）化に伴い，その活用分野は拡大を見せている．

①　現地監視

現地に測定器を設置し，測定した結果を現地で活用する方法であり，主に定期的な調査・計測や工事の施工管理で用いられている．計測したデータは，現地で収集され，日報や報告書として「オフライン」で関係者に閲覧される．

②　遠隔監視

構造物などの維持管理や防災上のために施設管理者が常時監視する必要がある時などは「遠隔監視システム」を採用することが多い．この場合は直接的に施設管理者等が橋梁施設の計測など遠隔地からリアルタイムにデータを監視することになり，異常値があったときなどに速やかな対応が可能となる．

管理事務所へ伝送されたデータは所内の LAN システムにより，データ処理系，記録・集配・表示系システムで構成されたシステムに蓄積される．これらは，道路管理防災システムや情報提供システムとして，今後発展が期待される「道路 ITS」へ進化していくものと考えられる．

(2)　遠隔監視システム

遠隔監視システムは，大きく以下の 2 つに区分される．

①現地測定+遠隔監視

現地に測定器を設置し，測定した結果を「オンライン」で配信する方法である．配信方法としては，電話網，光ファイバ，携帯電話，無線，インターネットなど　様々な方法がある．一般的に，現地に電源，通信設備，計測小屋等が必要となる．

②遠隔測定+遠隔監視

管理事務所などに測定器を設置し，直接，モニタリングを行う方法である．

近年，多用されているのは，道路管理者が整備している道路沿いの光ファイバ通信網

を活用することにより，遠隔地にある事務所・出張所等から複数の現場を一括してモニタリングすることも可能となる．この計測データは道路下に設置された情報ボックス内の光ファイバ網により管理事務所等へ伝送される．

現地に測定器を置く必要がないでの，現地に電源や測定小屋が不要であり，落雷等による欠測の恐れもなく，計測の信頼性が向上する．

図 2-3.1 は，光ファイバケーブルを伝送路として利用する場合の通信システムの基本構成例を示す．

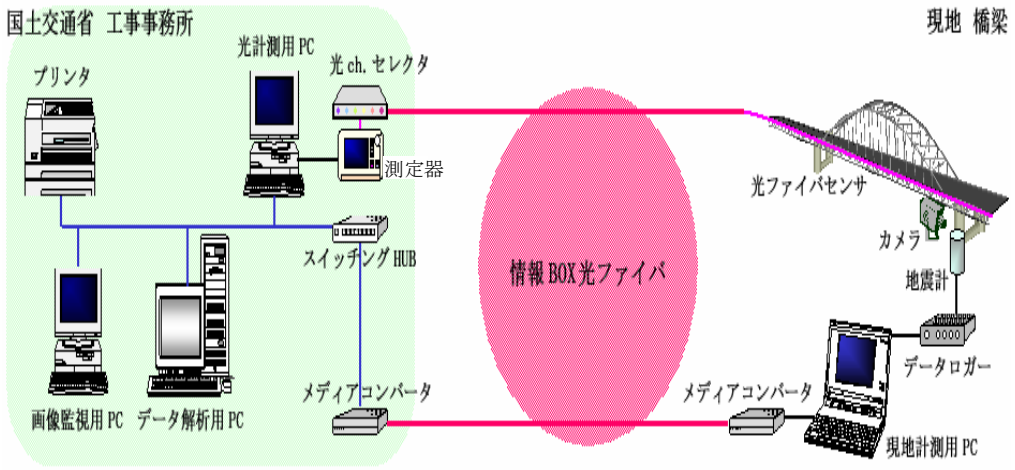


図 2-3.1　　通信システムの基本構成例

(3) 画像監視システム

計測数値データとともに，現場状況を直感的に把握することができる画像監視の必要性が高まっており，近年の通信方式の大容量高速化およびカメラ技術の進歩に伴い，画像データ表示が注目されている．カメラが設置されている各計測ポイントと監視センター間をネットワークを介して接続し，様々な画像情報を含むデータ配信を行うことが可能である．また，通信事業者の保有する広域 IP 通信網を経由して構築される仮想私設通信網（VPN）である IP-VPN を経由すれば，遠隔地のネットワーク同士を LAN で接続しているのと同じように運用することも可能であり，インターネットを介さないので，セキュリティーや通信品質を向上させることができる．ウェブ画面にはカメラで撮影した画像が表示されるが，それと同時に，異常を感知した時など必要に応じて，ウェブ上から監視カメラを遠隔操作できるため，現場に行かなくても監視センターから，ある程度の現場状況の把握および監視が可能となる．

(4)　課題

遠隔モニタリングシステムには，以下に示すような課題も残されており，実施にあたっては，これらに対する対策が必要と考えられる．

①伝送容量の大容量化：今後，取得される情報量は増加傾向にあり，必要とされる情報を取捨選択し，効率的な情報収集を行うとともに，伝送容量の増大を図る必要がある．

②セキュリティーの確保：情報公開など多数に閲覧可能なシステムが求められるが，悪意ある外部からの進入を遮断し，攻撃に対しても堅牢なシステムを構築する必要がある．

③データ処理の高速化：データ採取から結果の表示までの一連の作業が待たされることなく，スムーズに行わなければならない．機械の処理能力に頼るだけでなく，効率的な処理が行えるようなシステムの設計が必要である．

④データ規格の統一：多分野にて計測されたデータは，維持管理業務の効率化や災害発生

の事前予知等に用いられる．このため，収集データの規格統一を図り，集中管理を円滑に進める必要がある．

⑤システムの統合化：今までに培われた技術を発展させ，より高度で高機能な統合システムを構築し，地域社会貢献に寄与する必要がある

【参考文献】

1) 土木学会：【2001年制定】コンクリート標準示方書［維持管理編］，2001.1.
2) 日本コンクリート工学協会：コンクリート診断技術’06［基礎編］，2006.1.
3) 日本コンクリート工学協会：ＪＣＩ基準集，
4) 中川裕之，横田優，松田耕作：超音波法によるコンクリート物性予測手法に関する研究，コンクリート工学年次論文集，Vol.28，No.1，pp.1889-1894，2006.
5) 久保善司，山梨竜揮，森寛晃，佐藤彰：ＡＳＲ劣化コンクリートのＡＥ発生挙動に基づく劣化評価，コンクリート工学年次論文集，Vol.26，No.1，pp.951-956，2004.
6) 葛目和宏，森雅司，松本茂：アルカリ骨材反応を生じた構造物に適用する非破壊検査，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論文報告集　第2巻,pp.171-177,2002.
7) 野村倫一，葛目和宏，藤原規雄：ASRによる鉄筋破断に関する非破壊調査，コンクリート工学年次論文集，Vol.26，No.1，pp.2013-2018，2004.
8) 日本建築学会：建築工事標準仕様書・同解説　JASS5，1997.
9) ASTM C 457-98「Standard Test method for Microscopical Determination of Parameters of the Air-Void System in Hardened Concrete」
10) 高速道路技術センター：ＰＣグラウト設計・施工マニュアル（案），平成16.3
11) 日本鋼構造協会：指針－鋼橋塗膜調査，JSSC　IV-03，1982.
12) 土木学会：鋼橋における劣化現象と損傷の評価，1996.10.

第 3 編　補修補強技術

1　概要　3-1

2　既設構造物の劣化現象　3-2
2.1 鉄筋コンクリート構造物の劣化機構　3-2
2.1.1 劣化要因の種別　3-2
2.1.2 劣化過程と対応策　3-2
2.2 プレストレストコンクリート構造物の劣化機構　3-3
2.2.1 劣化要因の種別　3-3
2.2.2 劣化過程と対応策　3-4
2.3　鋼構造物の劣化機構　3-4
2.3.1 劣化要因の種別　3-4
2.3.2 劣化過程と対応策　3-5

3　対応策と具体的対策工　3-7
3.1 鉄筋コンクリート構造物への対応策　3-7
3.1.1 対応策の要求性能と評価方法　3-7
3.1.2 要求性能に応じた対策工と具体的工法　3-7
3.2　プレストレストコンクリート構造物への対応策　3-9
3.2.1　対応策の要求性能と評価方法　3-9
3.2.2　要求性能に応じた対策工と具体的工法　3-9
3.4 鋼構造物への対応策　3-10
3.3.1　対応策の要求性能と評価方法　3-10
3.3.2　要求性能に応じた対策工と具体的工法　3-10

4　延命化対策工選定システム　3-13

1　概要

戦前･戦後を通じて蓄積されてきた膨大な量の道路構造物は年月の経過とともに老朽化が進んできており，また塩害やアルカリ骨材反応などによるコンクリートの早期劣化，社会情勢の変化による交通量および重量車の増加，設計上想定外の地震作用などによって，さらに道路構造物の寿命が短縮される傾向になってきている．このような状況において，これらの道路構造物に要求される性能の現状を的確に評価し，将来の性能変化を的確に予測することによって，適用する最適な対策工の選定，適応時期ならびに適用規模の設定を行うことは，アセットマネジメントの観点から重要なことであると考えられる．

したがって，本編では道路構造物の内，重要な役割を果たす道路橋，即ち鉄筋コンクリート橋，プレストレストコンクリート橋，鋼橋に着目した延命化対策をテーマとして次のような内容で研究を実施した．

(1)　既設構造物に生じる主な劣化要因を選定し，その劣化機構や劣化パターンを述べるとともに，各劣化過程において構造物に要求される性能に応じた補修･補強･取替などの対応策の基本的な考え方を示した．

(2)　各劣化要因の劣化機構から対応策に求められる性能を述べ，施工初期段階および将来での性能を評価する方法を整理した．また，対応策に求められる要求性能に応じた対策工法の適用上の課題を挙げるとともに，具体的な対策工法をアンケート調査結果に基づいて推奨した．

(3)　(1)(2)の考え方を整理し，対象構造物の劣化要因･劣化過程を入力すれば，構造物に適応可能な対策工法をリストアップできる対話形式のプロトタイプ「延命化対策工選定システム」を構築した．

アセットマネジメントの考え方では，既設の道路構造物への費用対効果の優れた要求性能維持･向上対策を立案･計画する必要がある．そのためには，LCC，LCA，LCM などライフサイクルに基づいた評価基準を用いて，どの構造物から，どの時期に，どのような対策工を実施するのが最適かを考慮しなければならない．今回，構築したプロトタイプ「延命化対策工選定システム」を実用化まで発展させるには，このライフサイクルに基づく評価基準を導入する必要があり，今後の課題になると考えられる．

2 既設構造物の劣化現象

2.1 鉄筋コンクリート構造物の劣化機構

2.1.1 劣化要因の種別

コンクリート構造物の劣化現象の多くは，外部から空気、水、化学因子などがコンクリート中に侵入し，化学反応することにより生じる． これらには，「塩害」，「中性化」，「化学的侵食」，「アルカリ骨材反応」などの劣化機構がある．化学的作用による劣化機構以外には，物理的作用によるものとして，「疲労」と「凍害」などがある．ここでは，これら６種の劣化要因について述べる．

「塩害」は，文字通り“塩”の害であり，鉄筋コンクリート中の鉄筋腐食による劣化現象の一つである．鉄筋などの鉄は，コンクリート中では、鉄表面が不働態状態になり防食され，錆から守られている．しかし，コンクリート中に許容濃度以上の塩化物イオン(Cl-)が存在する場合，鉄筋表面の不働態が破壊され、鉄(鉄筋)は酸化反応をおこし，腐食が開始する．

「中性化」は，大気中の二酸化炭素がコンクリート内に侵入し，水酸化カルシウムなどのセメント水和物と炭酸化反応を起こすことにより，鋼材表面の不動態被膜が消失して，水分と酸素の供給により鋼材の腐食が生じ，その体積膨張によりコンクリートにひび割れが生じる現象である．

「アルカリ骨材反応」は，セメントと反応性骨材との反応によって，吸水膨張性のゲル状物質（アルカリシリカゲル）が生成され，これに水分が外部から供給されることにより，コンクリートが膨張する劣化現象である．アルカリシリカゲルの生成は，全ての種類の骨材において発生するのではなく，ある種の不安定な鉱物（シリカ鉱物など）を含む反応性骨材が混入されている場合に発生する可能性がある．

「化学的侵食」は，酸性物質をはじめとする化学物質がコンクリート表面から侵入して，コンクリート中のカルシウム化合物と反応して変質することにより発生する．化学物質は，コンクリート構造物の用途により，酸，アルカリ，油類，腐食性ガスなど様々である．

「疲労」は，物質そのもののもつ強度レベル以下の力であっても，それが繰り返し作用することにより破壊に至る現象であり，鉄筋コンクリート構造物においては，主にコンクリートが疲労を生じ，破壊に至ることが多い．コンクリートの疲労の劣化機構は，未だ不明な点が多く，骨材とセメントマトリックス間の付着力の低下や低応力下で発生したマイクロクラックの進展により有効断面積が減少していくことなどが起因すると考えられる．

「凍害」は，コンクリート中の水分の凍結膨張によって発生するものであり，長年にわたる凍結と融解の繰返しによってコンクリートが徐々に劣化する現象である．水が氷になるときに９％ほど体積が膨張することが知られているが，このことがコンクリート構造物の凍害を引き起こす原因となっている．

2.1.2 劣化過程の対応策

コンクリート構造物の性能低下は，コンクリートのひびわれや鋼材の腐食に起因するため，これらの状況をよく調査し，構造物の劣化状況が潜伏期，進展期，加速期，劣化期のいずれであるかを十分に見極め，劣化の影響を受ける性能を評価する必要がある．

疲労や凍害ではコンクリート表面のひび割れや表面の剥落などが劣化過程の指標となる．アルカリ骨材反応によるコンクリート構造物の劣化過程は，コンクリートの膨張量，およびそれに伴うひび割れの進展を指標とすることが提案されている．

塩害では，コンクリートの含有塩化物イオン量の測定，特に，コンクリート表面からの深さ方向の塩化物イオン量の分布を測定することが，Fick の拡散方程式等を用いて今後の劣化進行度合いを推定する上で重要である．

塩害，中性化，化学的侵食では，鋼材の腐食が劣化指標となる．鋼材腐食調査では，か

ぶりコンクリートをはつり出し，腐食の有無，位置，面積，孔食の有無，などを測定することが重要である．鋼材腐食に関する定量的なデータが得られれば，構造物の性能低下を定量的に評価することができる．

構造物の性能は，極力定量的な把握に努める必要がある．また，構造物の外観の変状からグレーディング評価を行い，定量的な評価とグレーディング評価を合わせて性能低下を適切に評価する．性能低下で対策が必要と判定された場合，要求性能を満足するような対策を選定しなければならない．定量的な評価に基づく判定が困難な場合には，構造物の劣化状態のグレードを基準として行うものとし，その例を**表 3-2.1** に示す．

表 3-2.1　構造物の外観上のグレードと対策(塩害)

構造物の外観上のグレード	点検強化	補修	補強	修景	使用性回復	機能性向上	供用制限	解体・撤去
状態Ⅰ－1 (潜伏期)	○	(○)						
状態Ⅰ－2 (進展期)	○	○						
状態Ⅱ－1 (加速期前期)	◎	◎		◎				
状態Ⅱ－2 (加速期後期)	◎	◎	◎	◎	◎	○	○	
状態Ⅲ (劣化期)		○	◎	○	◎	◎	◎	◎

◎：標準的な対策，○：場合によっては考えられる対策，(○)：予防的に実施される対策

出展：「2001 年制定　コンクリート標準示方書(維持管理編)　土木学会」

2.2　プレストレストコンクリート構造物の劣化機構

2.2.1　劣化要因の種別

プレストレストコンクリート（PC）構造物は，鉄筋コンクリート（RC）構造物で使用されるコンクリートに比べ強度が高く，水セメント比は低い．また，引張材にPC鋼材を配置しプレストレスを導入することによりひび割れを制御できるものである．PC構造物は適切に設計，施工，維持管理された場合は，極めて耐久性に富む構造であると言える．

PC構造物の主な劣化機構は，コンクリート構造物と同様に，塩害，中性化，アルカリ骨材反応，凍害，化学的侵食，疲労の６種類が考えられる．これらの劣化機構に，環境条件・荷重条件等の外的な要因と，コンクリートの配合，材料特性などの設計に関するもの，施工方法等の内的な要因が影響をおよぼすことによりPC構造物に劣化現象を引き起こすものである．加えて，PC構造物特有の劣化現象としてPC鋼材とグラウトに関連するものおよび定着部の損傷が挙げられる．

一般的に，コンクリート断面内に配置される内ケーブル工法のPC鋼材は，ダクト（シース）内に配置されており，PC鋼材の防錆および断面の一体化を図るためにグラウトを充填する．近年では，コンクリート断面の外側にPC鋼材を配置する外ケーブル工法と併用して用いられる場合も増加している．PC構造物は，これらのPC緊張材の存在やPCグラウト工の必要性があることにより，無筋あるいはRC構造と比べて，複雑な構造となる．材料的要因および施工的要因によるPCグラウト不良により定着部を含めたPC鋼材関連の腐食が誘発され，その後，塩害，中性化等の外的な一般劣化要因と相俟って定着部を含めたPC鋼材関連の腐食が進行するものである．

2.2.2　劣化過程と対応策

PC 鋼材関連の劣化現象の主たるものは鋼材腐食である．PC 鋼材の腐食をコンクリート標準示方書［維持管理編］に示される劣化予測に用いる４つの期（潜伏期，進展期，加速期，劣化期）に明確に分類することはできない．鋼材腐食は構造物内部で進行しており，その変状が外部に明確に表れるものではないからである．鋼材の腐食過程だけに着目して分類するならば，PC 鋼材の腐食発生限界に達するまでの潜伏期，PC 鋼材が腐食開始～断面減少を開始するまでの進展期，PC 鋼材に継続的に腐食が発生し PC 鋼材断面が減少する加速期，PC 鋼材が著しく断面減少を生じ，場合によっては PC 鋼材が破断にいたる劣化期となる．PC 構造物の外観の変状は，鉄筋の腐食が先行することにより PC 鋼材の腐食が進展していく場合が多く，鉄筋腐食の外観上の変状と連動することになる．まず，鉄筋腐食による体積膨張によりひび割れとして表れ（進展期），その後，ひび割れ等の劣化により PC 鋼材およびシースの腐食が進展する（加速期）．また，腐食により PC 鋼材の断面積の減少が生じ場合によって PC 鋼材の破断することによりプレストレスが減少し，ひび割れが急速に進展するとともにコンクリートの剥離・剥落が生じ，またたわみが急激に増加する（劣化期）．劣化期では特に安全性能において耐荷力が問題となる．

2.3　鋼構造物の劣化機構

2.3.1　劣化要因の種別

(1)　腐食

腐食は鋼材の表面部分で水分の存在により局部電池ができ，鉄がイオンになって溶出し酸化することで酸化鉄つまりさびが生じる現象である．腐食の生じやすい環境としては，一般的に海岸部では飛来塩分の影響により，鋼材の腐食量は他の地域に比べて圧倒的に多く，この飛来塩分量を腐食環境の主たる指標として，その防錆対策を施すことが多い．

一方，同一の腐食環境下でも，その構造特性や塗料をはじめとした防錆特性等の差異により腐食速度は異なる．例えば端部の支承周りで構造上，滞水が生じやすい箇所に伸縮継手や床版の破損により漏水している場合などは，腐食の進行が著しい．また，ボルトなどの突出部分は，塗膜の品質が確保しにくいため一般部に比べて錆の発生が早い傾向にある．

長大橋などで用いられるケーブルでも，内部に浸入した滞留水からケーブル内部を高湿度化して亜鉛メッキされた素線間に錆びが発生することが知られている．



写真 3-2.1　桁端部における腐食 [1)]



写真 3-2.2　現場継手部の腐食 [1)]

(2)　疲労亀裂

交通荷重などが繰り返し作用した場合，その発生応力レベルが低くても，構造的または

溶接形状に起因する応力集中から亀裂が発生し，進展する現象を疲労現象という．

一般的に鋼橋における疲労亀裂発生の事例を以下に示す．

①主桁と横桁の接合部　（損傷部：横桁付根の垂直補剛材溶接部周辺）

要因：横桁の荷重分配作用または輪荷重による床版のたわみに伴う二次応力が起因する．

②支承ソールプレート（損傷部：ソールプレート前面の溶接部）

要因：断面急変に伴う応力集中，支承の回転，移動機能の低下による応力の増加

③アーチ橋の垂直材（損傷部：垂直材の付根部）

要因：ピン結合で設計され実際の構造が剛結に近い場合，発生する２次応力に加えて

力の伝達がスムーズでない構造ディテール

④鋼床版（損傷部：縦リブの突合せ溶接，横リブと縦リブの交差部など）

要因：鋼床版は比較的薄い鋼板を溶接により組立てた構造であり，自動車荷重の繰返しを直接受けるため，疲労の影響を受けやすい．

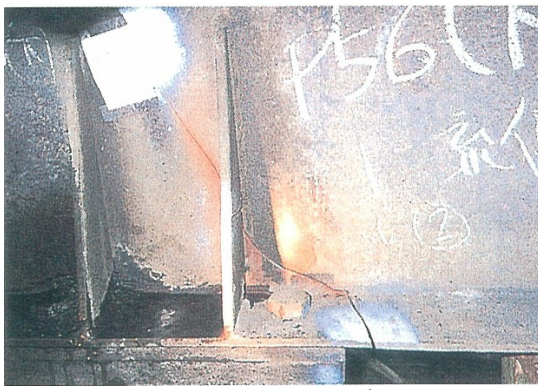


写真 3-2.3　支承ソールプレート溶接部付近の亀裂[1]

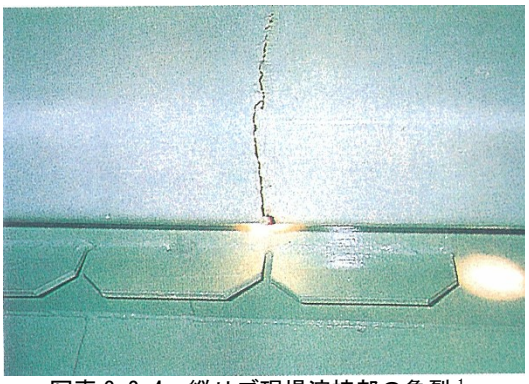


写真 3-2.4　縦リブ現場溶接部の亀裂[1]

2.3.2　劣化過程と対応策

(1)　腐食

腐食による劣化は，一般的には塗膜の状態に関連付けられる．また，付属物など各部品によって劣化の過程，程度が多少異なる．

対応策は，潜在期では「定期点検」を確実に実施し観察を続け，過渡期では塗替え計画を検討しつつ，腐食の要因が有れば除去を行う．加速期，劣化期では塗替えを行うことになるが，この時期を迎えるまでに日常点検の確実な実施により確実に処置を行っておくことが望まれる．

(2)　疲労亀裂

疲労亀裂の幅や長さが極めて小さく，塗膜により隠れている場合や溶接部の内部での微小な割れの場合は、通常の目視点検では発見するのは困難であるが，一般部における潜伏期から劣化期における劣化過程は，**表 3-2.3**，**表 3-2.4** のように定義されている．

対応策として、亀裂が発見された場合，亀裂の進展具合を観察しつつ，必要に応じてストップホールなどの応急対策を行う．また，疲労現象が２次応力などの応力集中により発生している場合には，応力集中の緩和策（フィレット，補強材）や全体系もしくは局所的に構造系を改良して２次応力の発生を抑えるといった対策が考えられる．

表3-2.2 鋼橋各部所の腐食による劣化対策

	劣化程度				
	一般部	桁端部	支承	伸縮装置	ケーブル
潜在期	さびの発生無し、白亜化した状態	桁端部の主桁が変色	さびの発生無し、白亜化した状態	シール材に損傷，脱落などがある	所々に白亜状の腐食有り
過渡期	部分的に点錆及び割れ，ふくれ，はがれ	水道有り，塗膜が損傷、発錆	部分的に点錆、割れ，ふくれ，はがれ有り	ﾌｪｰｽﾌﾟﾚｰﾄに錆が認められる	素線のメッキに腐食が出現，白色のパウダー状の残留物
加速期	発錆が広がり、割れ，ふくれ，はがれも多数		発錆がはなはだしく回転，移動の機能を有さず	全面的に錆が広がり減肉が始まっている	亜鉛メッキが不健全，鉄錆が点在、所々に亀裂が出現
劣化期	発錆がはなはだしい		腐食が激しく鉛直力支持機能を有さず	腐食による減肉が激しく強度不足	鉄錆が顕著，表面に窪み有り（亀裂、破断が発生する直前）

表3-2.4　鋼材の疲労による劣化期間の定義[2)]

劣化過程	定　義	期間決定の主要
潜伏期	疲労損傷が設計限界(疲労確率2．3%)に達するまで	疲労累積損傷応力頻度
進展期	疲労損傷が累積し、亀裂が点検で確認できるまで	疲労設計限界継手形状、疲労等級
加速期	疲労亀裂が進展し、鋼板を貫通するまで	応力集中係数亀裂進展速度
劣化期	亀裂が進展して部材が破断するまで	疲労破壊脆性破壊塑性破壊

表3-2.5　付属物の亀裂による劣化程度[2)]

	劣化程度	
	支承	伸縮装置
潜在期	移動回転機能低下	車両通過時に僅かに異常音
過渡期	滑り，転り部に摩耗，ローラーなどの部材に変形	ﾌｪｰｽﾌﾟﾚｰﾄに変形．溶接部に割れ．
加速期	鉛直荷重支持部材にひび割れ	ﾌｪｰｽﾌﾟﾚｰﾄや溶接部に著しい割れ
劣化期	鉛直荷重を支持部材が圧壊．ローラーやﾍﾞｱﾘﾝｸﾞﾌﾟﾚｰﾄが逸脱．	ﾌｪｰｽﾌﾟﾚｰﾄのﾌｨﾝｶﾞｰが破断，シール材が噴出

3　対応策と具体的対策工

3.1　鉄筋コンクリート構造物への対応策

3.1.1　対応策の要求性能と評価方法

(1)　対応策の要求性能

鉄筋コンクリート構造物の劣化に対して補修･補強などの対応策を実施する場合には，対応策への要求性能を明確にする必要がある．各種の劣化に共通する要求性能として，「劣化因子の遮断」，「劣化速度の抑制」，「劣化因子の除去」があげられる．ここで，劣化因子には塩化物イオン（塩害），二酸化炭素（中性化），水（塩害，中性化，凍害，ＡＳＲ，床版疲労），酸類･塩類（化学的侵食），酸素（塩害，中性化）などが，劣化速度には鉄筋の腐食速度（塩害，中性化），膨張速度（ＡＳＲ），コンクリートの侵食速度（凍害，化学的侵食），剛性低下速度（床版疲労）などが考えられる．

(2)　要求性能の評価方法

「劣化因子の遮断」が要求される対応策として，既設構造物では表面処理（被覆や改質）やひび割れ補修などが，新設される構造物では高耐久性埋設型枠やエポキシ樹脂被覆鉄筋の使用などがある．これらの対応策の長期的な性能は，室内で行われる促進試験などで評価される場合が多い．しかしながら，環境条件や施工条件などさまざまな要因によって，実構造物では同じ性能が得られるとは限らないため，対応策を実施した構造物の外観変化や部分破壊試験などの追跡調査により再評価することが重要である．部分破壊試験が困難な場合には，同環境に供試体を曝露して評価することもできる．なお，適切な排水処理や定期的な清掃などの対応策も「劣化因子の遮断」として有効である．

「劣化速度の抑制」が要求される対応策としては，既設構造物では電気防食（鉄筋腐食），リチウムイオン圧入（ＡＳＲの膨張），断面増加・部材増設（疲労による剛性低下）などが，新設される構造物ではステンレス鉄筋の使用（鉄筋腐食）などがある．これらの対応策を評価する方法は，追跡調査（鉄筋の腐食状況やひび割れ発生状況）が基本と考えられる．ただし，電気防食では防食電流のモニタリングで，リチウムイオン圧入ではコアの促進膨張試験で評価することもできる．なお，凍害や化学的侵食の劣化速度を抑制する有効な対応策は，「劣化因子の遮断」である．

「劣化因子の除去」が要求される対応策としては，劣化因子を含むコンクリートのはつり除去がある．はつり除去には断面修復が必要となるが，脱塩（塩害）や再アルカリ化（中性化）など断面修復を必要としない対応策もある．はつり除去では劣化因子が取り除かれるので，構造物は健全な状態に戻ると評価できるが，事前調査によりはつり深さを適切に設定する必要がある．また，断面修復材料の性能を室内試験や構造物の追跡調査（ひび割れや剥離の確認）などによって評価することも重要である．脱塩･再アルカリ化では，構造物から採取したコアの含まれる劣化因子の量を測定することで適切な状態まで劣化因子が除去されたことを評価する．いずれの対応策においても，環境条件や使用条件が変化しない場合には再度同じ劣化が進行すると予測されるので，劣化因子を遮断する対応策を併せて実施することが重要である．

3.1.2　要求性能に応じた対策工と具体的工法

(1)　対策工

各劣化要因で要求性能ごとの一般的な対策工は**表 3-3.1**，**表 3-3.2** のとおりである．

表中の各工法は一般的に適用性が高いということであり，要求性能と劣化の進行過程の他諸条件を考慮して，適切な工法を選定することが大切である．また，劣化期にある構造物においては，構造物が有している残存性能を調査するとともに，期待する予定供用期間を考慮した適切な補修・補強工法を選定することが重要である．

(2)　具体的工法

具体的工法としては，補修・補強に関する指針，マニュアル等に掲載されている各工法を収集するとともに，当研究会参加企業が保有している最新技術も網羅し，延命化対策工選定システムのデータベースに供した.

表 3-3.1　疲労を除く各劣化要因に対する補修・補強工法

劣化要因	要求性能	潜伏期	進展期	加速期	劣化期
塩害	劣化因子の遮断	表面被覆		表面被覆・ひび割れ補修	
	劣化速度の抑制	電気防食			
	劣化因子の除去	-----		電気化学的脱塩・断面修復	
	耐荷力・変形性能の改善	-----	-----	-----	補強・打換え
アルカリ骨材反応	劣化因子の遮断	表面被覆		表面被覆・ひび割れ補修	
	劣化速度の抑制	拘束・含浸材塗布・リチウム圧入		-----	
	劣化因子の除去	含浸材塗布		断面修復	
	耐荷力・変形性能の改善	-----	-----	-----	補強・打換え
中性化	劣化因子の遮断	表面被覆		表面被覆・ひび割れ補修	
	劣化速度の抑制	含浸材塗布			
	劣化因子の除去	再アルカリ化		再アルカリ化・断面修復	
	耐荷力・変形性能の改善	-----	-----	-----	補強・打換え
凍害	劣化因子の遮断	表面被覆 表面含浸処理		表面被覆	
	劣化速度の抑制	-----		ひび割れ補修	
	劣化因子の除去	-----		断面修復	
	耐荷力・変形性能の改善	-----	-----	-----	補強・打換え
化学的侵食	劣化因子の遮断	表面被覆			
	劣化速度の抑制	-----		ひび割れ補修	
	劣化因子の除去	-----		断面修復	
	耐荷力・変形性能の改善	-----	-----	-----	補強・打換え

表 3-3.2　疲労に対する補修・補強工法

要求性能（期待する効果）	工法例
第三者影響度、美観・景観の改善	表面処理（被覆）
水の影響を除くことによる疲労耐久性の向上	床版防水の設置
ひび割れ開口の抑制による疲労耐久性の向上	ＦＲＰ接着、プレストレスの導入
引張縁への部材設置による断面剛性の回復	床版下面への鋼板等の接着、 RC 断面の増厚、増設桁の設置
圧縮側断面のせん断剛性の向上による疲労耐久性の向上	床版上面増厚

3.2 プレストレストコンクリート構造物への対応策

3.2.1 対応策の要求性能と評価方法

(1) 対策案の要求性能

a. PC 鋼材腐食の防止

PC 構造物は PC 鋼材によるプレストレスにより構造物に所要の耐荷力を与えるものである．また，PC 鋼材とコンクリートの付着を確保することも，PC 構造物の耐荷力上重要である．したがって PC 鋼材の腐食防止は PC 構造物延命化の観点から重要な要求性能である．PC 鋼材の腐食防止の対策案としては，
①グラウト再注入，②定着部保護工，③橋面防水，④表面保護工法（RC 構造物の鉄筋腐食防止と共通），⑤ひび割れ補修（RC 構造物の鉄筋腐食防止と共通），⑥電気防食（RC 構造物の鉄筋腐食防止と共通），⑦脱塩工法（RC 構造物の鉄筋腐食防止と共通）などが挙げられる．上記には RC 構造物の鉄筋腐食防止と共通の対策案もあるが，PC 鋼材腐食防止特有の対策案としては，グラウト再注入，定着部保護工ということになる．

b. PC 鋼材損傷時の耐荷力の確保

調査の結果，PC 鋼材が腐食により破断もしくは破断の可能性が確認された場合，補強により耐荷力を確保する必要がある．PC 鋼材損傷時の補強工法としては，①プレストレス導入工法（外ケーブル補強など），②補強材接着工法（RC 構造物の補強工法と共通），③断面増厚工法（RC 構造物の補強工法と共通）などが挙げられる．PC 構造物の補強工法として最も多く用いられているのは，プレストレス導入工法であり，不足した（不足する可能性のある）プレストレスを外ケーブルなどで補う工法である．

(2) 要求性能の評価方法

ここでは，要求性能の評価方法として PC 構造物への対策特有のものについて述べる．

a. PC 鋼材腐食の防止策についての評価方法

① グラウト再注入

グラウト再注入の評価方法としては施工時および施工後に行うものがある．施工時においては，排出口の確認および注入量の管理である．施工後は，削孔による充填確認あるいはＸ線による充填確認などが挙げられる．

② 定着部保護工

定着部保護工の評価方法としては，その主目的が定着部からの劣化因子侵入防止であることから，表面保護工法と同様，止水が確実にできているか確認することによる．

b. PC 鋼材損傷時の耐荷力の確保についての評価方法

① プレストレス導入工法（外ケーブル補強など）

プレストレス導入工法の評価方法は，プレストレスが確実に導入されたことを確認することによる．一般には，補強 PC 鋼材緊張時に PC 鋼材の緊張力と伸びの関係を確認する緊張管理による．

3.2.2　要求性能に応じた対策工と具体的工法

(1)　対策工

PC 構造物特有の劣化機構として，PC 鋼材の腐食が主たるものであり，その主な要因としてグラウトの充填不良，塩害などが考えられる．PC 構造物特有の変状に対する対策工は，期待する効果や劣化程度に応じて表 3-3.3 に示される工法の中から選定されるのが一般的である．また，PC 橋にみられる劣化機構が塩害，中性化，アルカリ骨材反応，凍害，化学的侵食，疲労の 6 種類の劣化要因である場合，「3.1　コンクリート構造物への対応策」で示した表 3-3.1，表 3-3.2 を参照することができる．

表 3-3.3　PC 鋼材関連の劣化に対する補修・補強工法の選定

要求性能		潜伏期	進展期	加速期	劣化期
PC 鋼材関連の劣化	劣化因子の遮断	グラウト再注入			
		橋面防水			
		表面保護			
		------	ひび割れ補修		
		定着部保護			
	劣化速度の抑制	電気防食			------
	劣化因子の除去	------	電気化学的脱塩		------
	耐荷力・変形性能の改善	------	------	外ケーブル補強	
		------	------	接着工法	
		------	------	増厚工法	

(2)　具体的工法

具体的工法としては，3.1.2 で示したコンクリート構造物の場合と同様に，補修・補強に関する指針，マニュアル等に掲載されている各工法を収集するとともに，当研究会参加企業が保有している最新技術も網羅し，延命化対策工選定システムのデータベースに供した．

3.3　鋼構造物への対応策

3.3.1　対応策の要求性能と評価方法

(1)　腐食

鋼構造物では，普通鋼材に塗装または亜鉛メッキ，亜鉛溶射を施す場合と耐候性鋼板を用いて安定錆による防錆を行う場合があり，両者により対応策も異なってくるが，大義的には要求性能と評価方法は，概ね下記のようになる．

①要求性能：機能の低下した表面塗膜を除去し，新規の防錆機能を形成する．
　評価方法：素地調整の程度確認と塗膜検査（膜厚，塩分測定など）
②要求性能：断面欠損した部位の腐食部分を除去し，断面回復を行う．
　評価方法：全く原型復旧する場合は評価の必要なし．接合部が原型と異なる場合は接合部の強度，耐久性など

(2)　疲労亀裂

疲労亀裂が発生する要因は変動応力とその繰り返し，また局部における応力状態を支配

する要因は部材形状や溶接部の形状による応力集中と考えられる．従って，対応策の要求性能と評価方法は下記のようになる．

①要求性能：亀裂の進展を抑制する．
　評価方法：経過観察を継続して，亀裂が進展していないことを確認する．
②要求性能：亀裂部を修復する（初期状態に復帰させる）．
　評価方法：経過観察を継続して，亀裂が発生していないことを確認する．
③要求性能：亀裂を修復した上で再発を防止する．
　評価方法：再発防止は具体的には応力集中の低減となるので，設計計算上で低減量を確認した上で，ひずみゲージなどで確認できる．

3.3.2　要求性能に応じた対策工と具体的工法

(1)　腐食

①要求性能：機能の低下した表面塗膜を除去し，新規の防錆機能を形成する．
　対策工１：塗替え塗装　錆や劣化した塗膜を除去（素地調整と呼ばれ，そのグレードは腐食の程度によって異なる）し，新規の塗装を施す．
　対策工２：亜鉛溶射　劣化した塗膜を完全に除去し，溶融した亜鉛を吹き付けることにより，通常の塗装よりグレードの高い防錆機能を形成する．
②要求性能：局部形状を改善し，応力集中を緩和する．
　対策工１：板継溶接　断面欠損部位を切断・除去し．鋼板を板継溶接によって溶接取付けする．
　対策工２：当板補強　断面欠損部にボルト添接または溶接によって当板を設置し，不足断面の補強とする．

(2)　疲労亀裂

①要求性能：亀裂の進展を抑制する．
　対策工　：ストップホール　亀裂先端に円形の孔を設けて応力を緩和することにより，それ以上の亀裂の進展を抑制するもので応急処置的といえる．
②要求性能：亀裂部を修復する（初期状態に復帰させる）．
　対策工　：部材の取替え　亀裂が存在する部材を切断除去して新規製作した部材を設置する．（溶接部の直し，グラインダーによる亀裂除去を含む）
③要求性能：亀裂を修復した上で再発を防止する．
　対策工１：②と同様に亀裂部を修復する上で，応力集中を低減させるため部材寸法を大きくする．または，疲労亀裂進展抑制に優れた鋼材（耐疲労鋼など）に置き換える．
　対策工２：②と同様に亀裂部を修復する上で，局部形状を改善して応力集中を緩和する（フィレット構造など）．
　対策工３：②と同様に亀裂部を修復または亀裂を放置した上で，バイパスリブ，当板アーチ垂直材間へのトラス材の追加など構造条件の改善による応力の低減を図る．

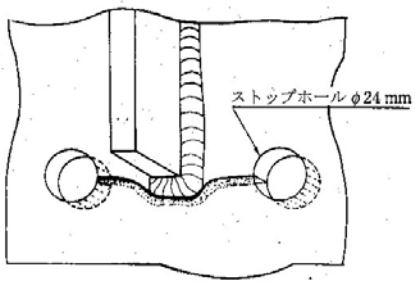


図 3-3.1　ストップホール [1)]

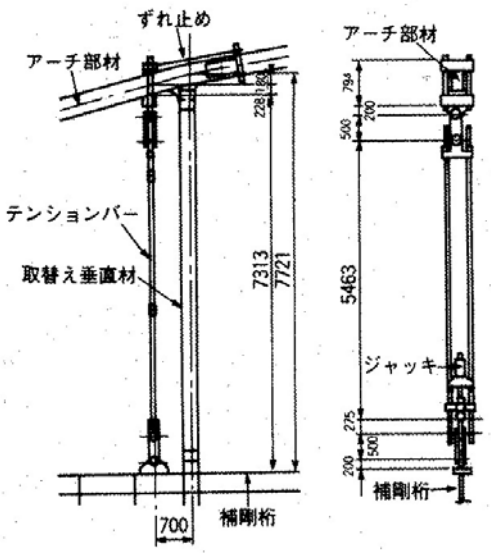


図 3-3.2　部材取替え（アーチ吊材）[1)]



写真 3-3.1　当て板 [1)]

4 延命化対策工選定システム

既設構造物の現在の性能を評価する「健全度評価」と，将来の状態を予測する「劣化予測」を適切に実施したうえで，さまざまな対策工法の中から最適なものを選定することにより，構造物の延命化において最良の効果を得ることが可能となる．ところが，現状では対策工に関する技術データなどが共有されてなく，各工法の効果，費用を客観的に示すデータが不足しており，最適な工法の選定は難しい状況である．

当研究会では，既設構造物の補修，補強技術の情報を収集し，効果の追跡，評価を行い共有化できるデータベースの構築を目指している．そのなかで，それらデータベースを活用し，健全度評価と劣化予測結果を適用することにより，常に最適な補修・補強工法が選定できるシステムの構築を行ってきた．このほど「延命化対策工選定システム」のプロトタイプが完成したので報告する．

「延命化対策工選定システム」は，橋梁構造物のうちRC造，PC造，ＳＴ造の構造形式の橋梁を対象としている．各構造形式毎に，劣化要因や劣化程度などの健全度評価を反映して選択するものである．それら選択肢や選択により自動選定，表示する項目は**表 4.1** のとおりである．**図 3-4.1**，**3-4.2**，**3-4.3** は，延命化対策工選定システムによる選定状況の一例である．プロトタイプの選定システムでは，補修するのか，補強まで行うのかといった対処方法や，どのような目的の補修・補強技術にするのかといった選定は，システム利用者の判断によるが，今後は，補修・補強技術の収集とそれら個別の評価により，最良の技術を選定できるように考えている．

これまでの研究をふまえ，延命化対策工選定システムの目標は，**図 3-4.4** に示すようなフローを考えている．LCC，LCA，LCMなどライフサイクルに基づいた評価基準を導入し，延命化対象構造物の部位部材や劣化時期において最適な対策工が選定できるようにするとともに，WG1～WG3 の研究成果を統合し，構造物の点検・調査，判定・評価・シナリオ構築，対策工の選定までの一連の指標を示すことが今後の課題である．

表 3-4.1　延命化対策工選定システム　表示選択項目

	表示項目	表示、選択肢					
1	橋梁形式	RC橋	PC橋	鋼橋			
2	部位・部材	床版	主桁	橋台	橋脚	沓	
3	劣化要因	塩害	ＡＳＲ	疲労	中性化	凍害	化学的侵食
4	劣化程度	潜伏期	進展期	加速期	劣化期		
5	対処方法	補修	補強	取替			
6	要求項目１	対策工法の要求される大項目を表示、選択					
7	要求項目２	対策工法の要求される小項目を表示、選択					
8	工法１	適切な工法を表示、選択					
9	具体的工法	具体的工法を表示					



図 3-4.1　延命化対策工選定システム起動画面

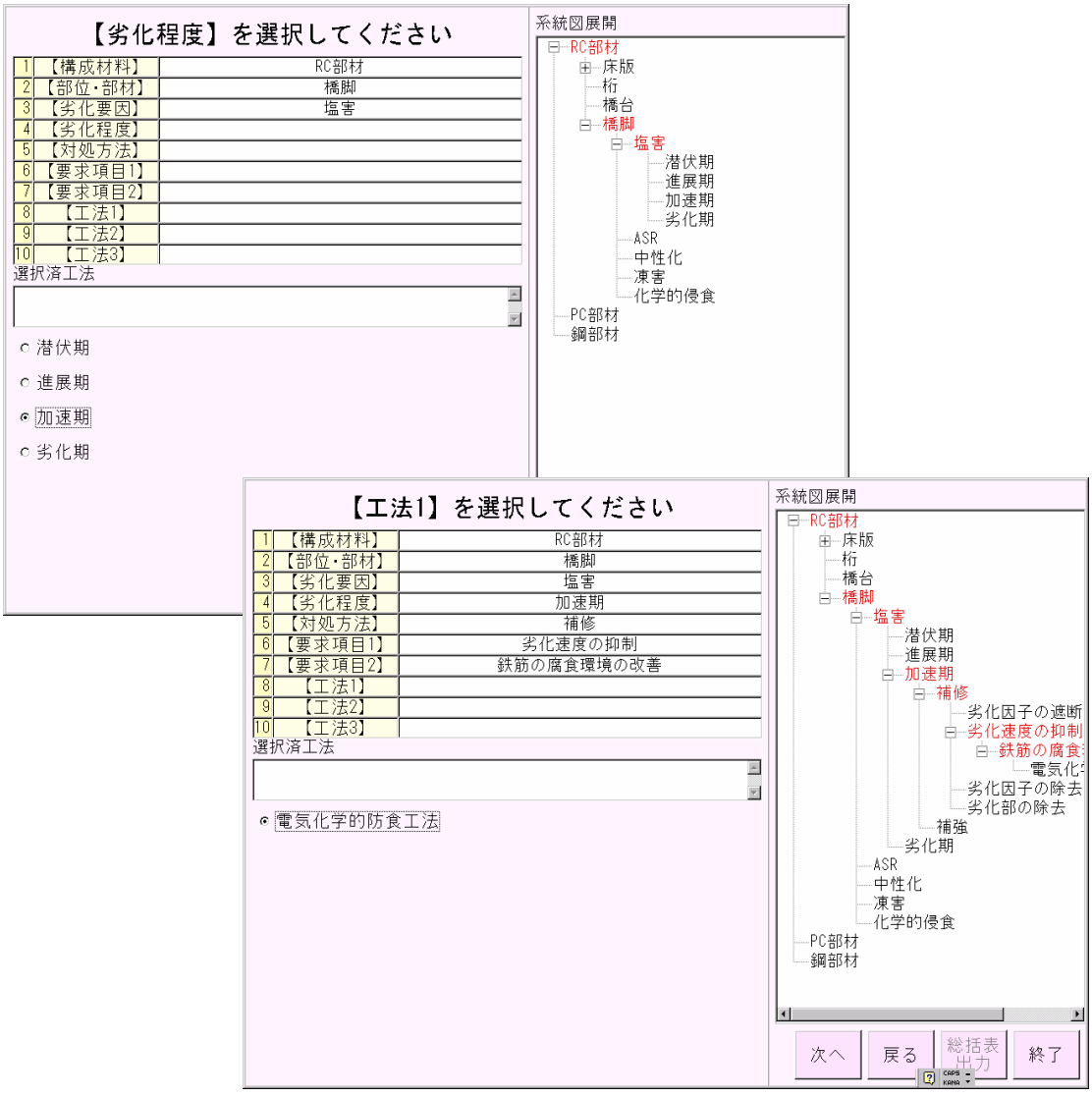
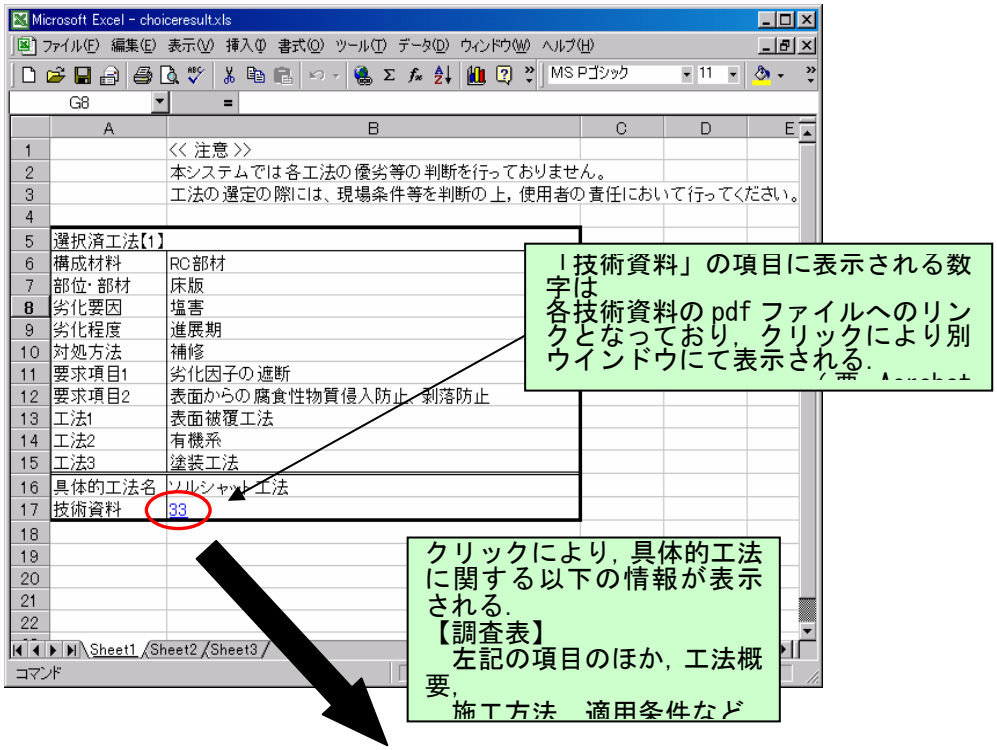


図 3-4.2　メイン画面の表示例



橋梁構造物延命化技術　調査表

技術名称		○○工法				
副　題		△△によるコンクリートの劣化補修				
開発会社名		A株式会社				
	問合先 部署名	土木本部延命課		担当者名	延命太郎	
	問合先 TEL	12-3456-7890	内線	000	FAX	12-3456-7899
	問合先 E-Mail	enmei@aaa.co.jp				
	問合先 URL	http://www.enmei.co.jp				
開発体制		☐単独 ☑共同研究（ ☑民民 ☐民官 ☐民学 ☑民官学 ）				
	共同研究名	○○工法協会				
	共同研究ﾒﾝﾊﾞｰ	B株式会社，C株式会社				
技術適用項目	適用橋梁構造形式 RC・PC	☑RC・PC造 ☐PC鋼材関連（ｸﾞﾗｳﾄ含む）				
	適用橋梁構造形式 ｽﾁｰﾙ	☐ST造（一般部） ☐ケーブル（PC緊張のためのケーブル以外）				
	適用橋梁構造形式 共通	☐その他（				
	適用劣化要因 RC・PC	☑塩害 ☐ASR ☐疲労 ☑中性化 ☐凍害 ☐化学的腐食				
	適用劣化要因 ｽﾁｰﾙ	☐鋼材腐食（塗装劣化） ☐鋼材の亀裂 ☐全体系（例：全体系の変形、以上振動、異音等）				
	適用劣化要因 共通	☐その他（				
	適用劣化時期	☐潜在期 ☑進展期 ☑加速期 ☐劣化期				
	対処方法	☑補修技術 ☐補強技術 ☐取替技術 定義はここをクリック				
	要求性能	☑劣化因子の遮断 ☐劣化速度の抑制 ☐劣化因子の除去 ☐耐荷力・変形性能の改善				
		☐その他（				
	方法	☑表面被覆 ☑含浸材塗布 ☐ひびわれ補修 ☐断面修復				
		☐補強 ☐打換 ☐交換 ☐拘束				
		☐電気防食 ☐再アルカリ化 ☐電気化学的脱塩				
		☐補強材追加 ☐断面増加 ☐内部圧入 ☐防水材散布				
		☐グラウト再注入 ☐プレストレス導入 ☐PC鋼材定着部防護				
		☐支持点追加 ☐溶接 ☐塗替				
		☐その他（				

図 3-4.3　選定結果の表示例

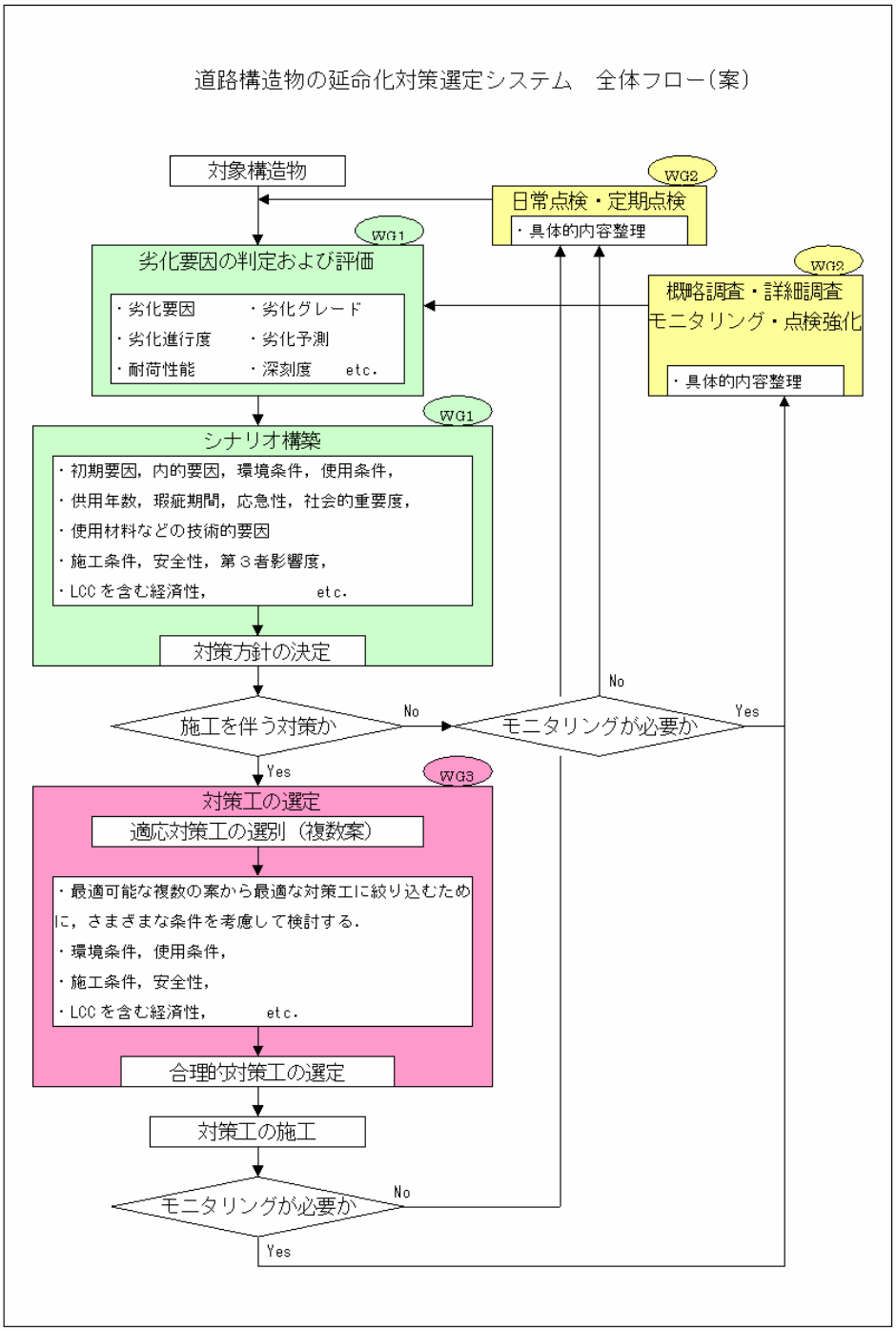


図 3-4.4　延命化対策工選定システム将来像

第４編　実地モニタリング
および実装システム

1　U橋の概要　4-1

2　モニタリング計画　4-1

3　計測技術　4-3
3.1　ひずみ計測，加速度計測　4-3
3.2　変位計測　4-4

4　モニタリングシステム　4-5
4.1　現地計測　4-5
4.2　遠隔モニタリング　4-5
4.3　光ファイバ通信による遠隔地での測定　4-6

5　管理計画　4-7
5.1　事前測定　4-7
5.1.1　基準車両　4-7
5.1.2　電気式センサ　4-8
5.1.3　OSMOS　4-11
5.2　管理画面のイメージ　4-12

1　U 橋の概要

モニタリング例の実施対象である U 橋は，昭和 35 年（1960 年）に建設された 7 径間ゲルバー鋼鈑桁橋であり，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．よって本プロジェクトでは，疲労損傷を主な損傷形態とする U 橋に対し遠隔モニタリングを実施することで，荷重特性の把握，疲労損傷の把握，異常イベントの検知，劣化予測，計測点検項目の整理等を行うことを目的とする．また平成 16 年に床版の増厚補強が行われたことから，補強工法に対する補強効果の確認も行う．
U 橋の諸元を**表 4-1.1** に，外観を**図 4-1.1** に示す．

表 4-1.1　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



概観(1)



概観(2)

図 4-1.1　U 橋の外観

2　モニタリング計画

U 橋におけるモニタリング計画を**図 4-2.1** に示す．今回のモニタリングでは，U 橋の主要劣化要因である疲労損傷に着目し，交通車両の軸重の大きさおよび頻度，部材に発生する応力頻度，伸縮目地位置の衝撃力，床版の振動を計測することで，疲労損傷状態を把握することを目的とする．また遠隔カメラによる亀裂監視も行い，現状の劣化診断，将来的な劣化予測，また異常値の早期発見を目指すシステム構成となっている．U 橋での計測区間を**図 4-2.2**，**図 4-2.3** に示す．

モニタリング計画線表(全体)

		平成15年度	平成16年度	平成17年度	平成18年度	平成19年度～
U橋補修工事		床版増厚 AS舗装 ジョイント工事 配水管工事 H16.1～	シュー取替 床版クラック注入 主桁端部補強 横桁補強 塗装 H16.11～			
延命化委員会	現地計測	変位、加速度、ひずみ、カメラ等　設置 計測　計測	計測			
	遠隔モニタリング		遠隔モニタリングシステムの検討	システム構築	モニタリング	

図 4-2.1　U 橋におけるモニタリング計画

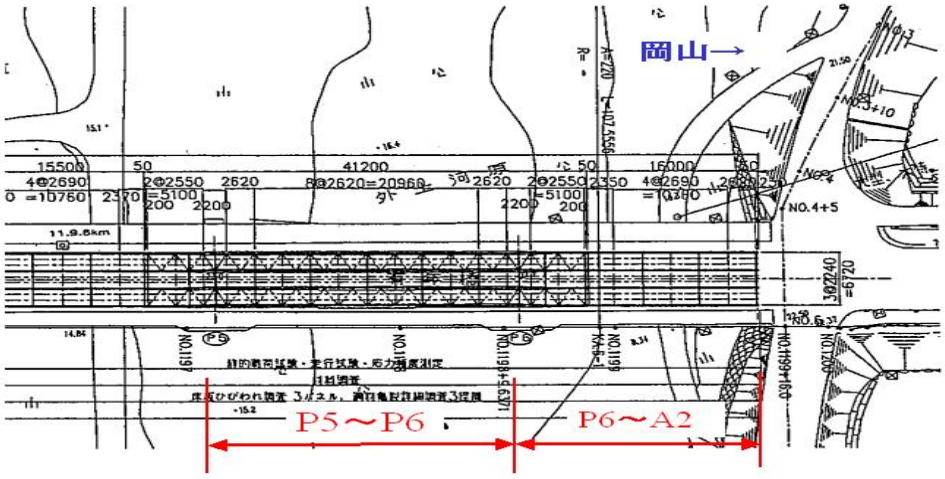


図 4-2.2　U 橋の計測区間（平面図）

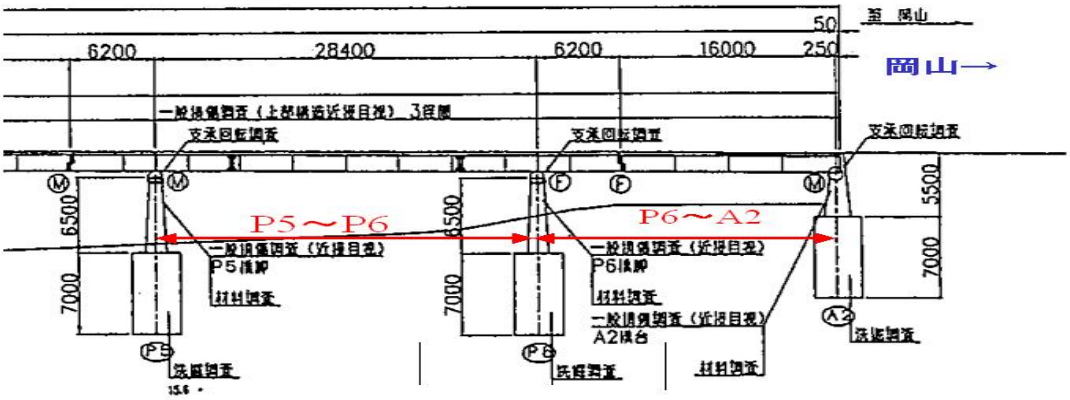


図 4-2.3　U 橋の計測区間（側面図）

平成 15，16 年度と現地計測を行い，平成 17 年度に遠隔モニタリングの検討を行い，平成 18 年度よりシステム構築，モニタリング実施としている．

3　測定技術

U 橋のモニタリングでは，ひずみ計，変位計，加速度計等を設置する予定である．以下では，適用センサ別に計測の概要と目的について示す．

3.1　ひずみ計測，加速度計測

ひずみ計測および加速度計測の目的は，軸重推定，応力頻度測定，衝撃力の把握，および振動特性による床版劣化の把握である．センサの設置箇所と着目現象を**表 4-3.1** に示す．

表 4-3.1　センサの設置箇所と着目現象

着目部材	センサ	測定項目	指標
桁端部垂直補剛材	ひずみゲージ	ひずみ	軸重推定
主桁隅角部	ひずみゲージ	ひずみ	応力頻度
端横桁	加速度計	加速度	衝撃力
床版	加速度計	加速度	振動特性

1)　軸重の大きさおよび頻度

構造体への作用力である軸重の大きさと頻度を把握することで，構造体の疲労損傷度を定義することが可能である．さらには構造解析モデルへ入力値として与えることで，軸重頻度と各部材の応力頻度とリンクさせ，部材の疲労損傷度を推定することができる．

2)　部材の応力頻度

部材の応力頻度は，疲労損傷度と直結できる．また軸重推定による応力頻度と，直接計測による応力頻度を比較することで，構造モデルの整合性や，変状の検知に応用できる．

3)　伸縮目地位置の衝撃力

伸縮目地は，橋梁部位の中で最も損傷を受けやすい部位の一つである．よって，目地に発生する衝撃力を測定することで，衝撃力の発生頻度，大きさ，エネルギー等と伸縮目地の損傷との相関を把握する．

4)　床版の振動

床版は，車両の軸重を直接受ける部材であり，最も疲労損傷を受けやすい部材である．よって，床版の常時微振動および車両通過による振動を計測することで，固有振動数変化や減衰などを指標として，床版の疲労劣化との相関を把握する．加速度計は，床版と主桁に設置する．また、近年、開発が盛んにおこなわれようになっている無線センサ方式（**図 4-3.1**）についても、試行的に設置を行い、加速度の計測を行う予定である。



無線センサ



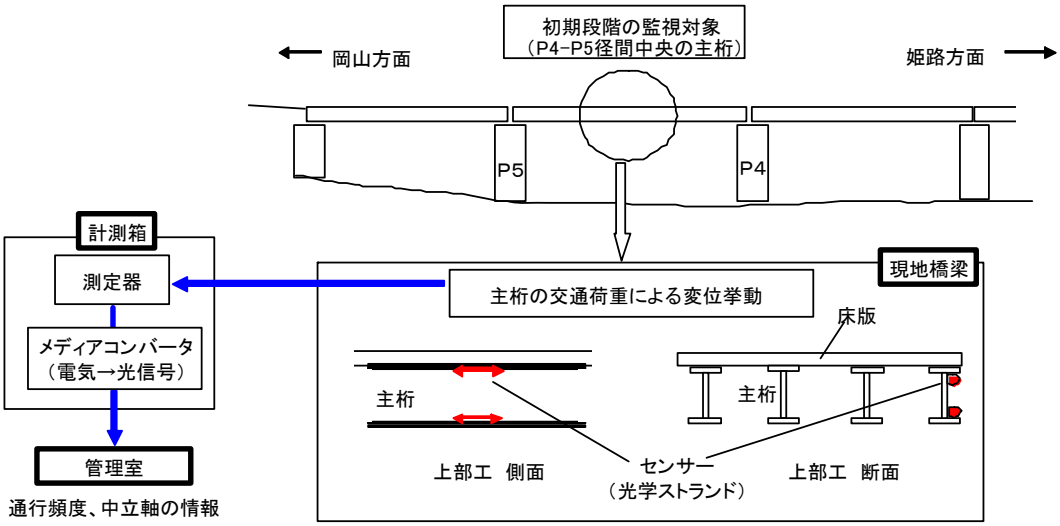
設置状況

図 4-3.1　無線センサ計測システム

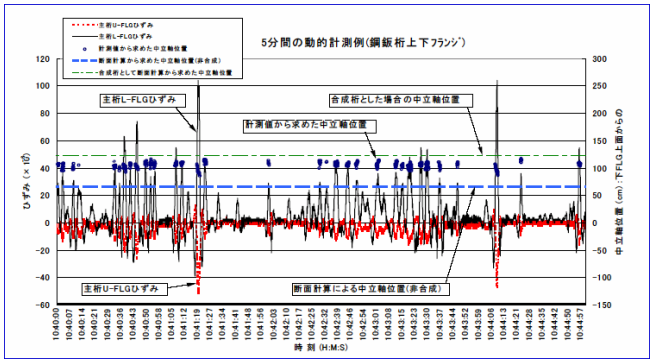
3.2　変位計測

ここでは，変位計測技術である OSMOS による計測について示す．有年橋の橋脚 P5－P6 の径間の上り車線を監視対象とし，交通車両が通過したときの鋼製主桁の変位挙動によるモニタリングを試行する．センサー（光学ストランド）は 4 本存在する主桁のうち，最上流部側主桁の上下フランジに設置を予定している．なお，状況に応じてはセンサの増設も考える．

測定そのものは橋梁近傍の計測箱で行い，得られた測定結果から交通荷重の通行頻度の情報および主桁の中立軸位置の情報に変換し，光通信によって遠隔地の管理室で確認，管理する．モニタリングの概要および測定結果の例（平成 16 年度測定）を以下に示す（**図 4-3.2**）．



(a) モニタリングの概要



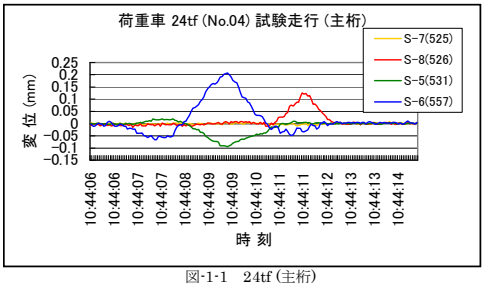


図-1-1　24tf (主桁)

左図の一部を拡大表示

(b) 測定結果の例（平成 16 年度のモニタリング結果より）

図 4-3.2　OSMOS による有年橋モニタリングの概要

4　モニタリングシステム

4.1　現地計測

現地計測における計測システムを**図 4-4.1** に示す.センサは常時上部工に設置しておき,計測実施時に測定器を現地に設置する方式とした.

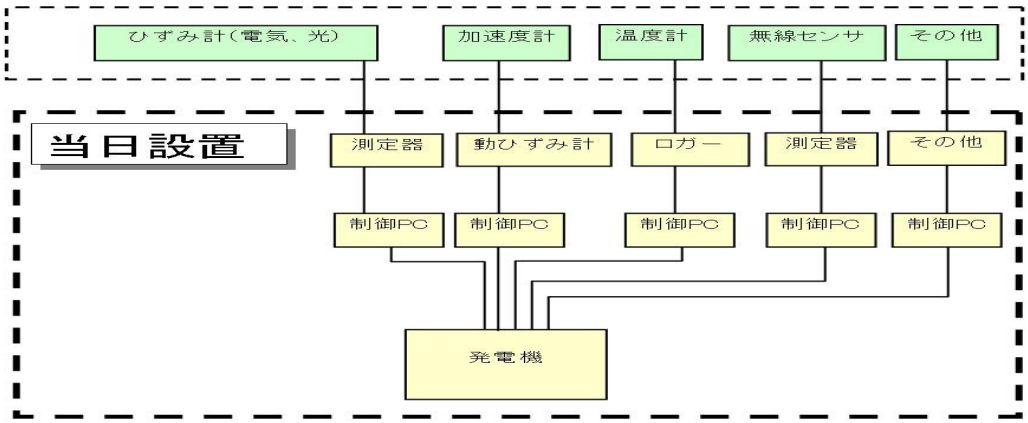


図 4-4.1　現地計測システム

4.2　遠隔モニタリング

遠隔モニタリングにおける計測システムを**図 4-4.2** に、概要を**図 4-4.3** に示す。測定器を収容する計測ハウスを現地に設置し、測定したデータを国土交通省の光ファイバ回線を使用して、管理事務所へ転送する。また、測定したデータについては、大学や研究所などにでも配信できるシステムとする計画である。

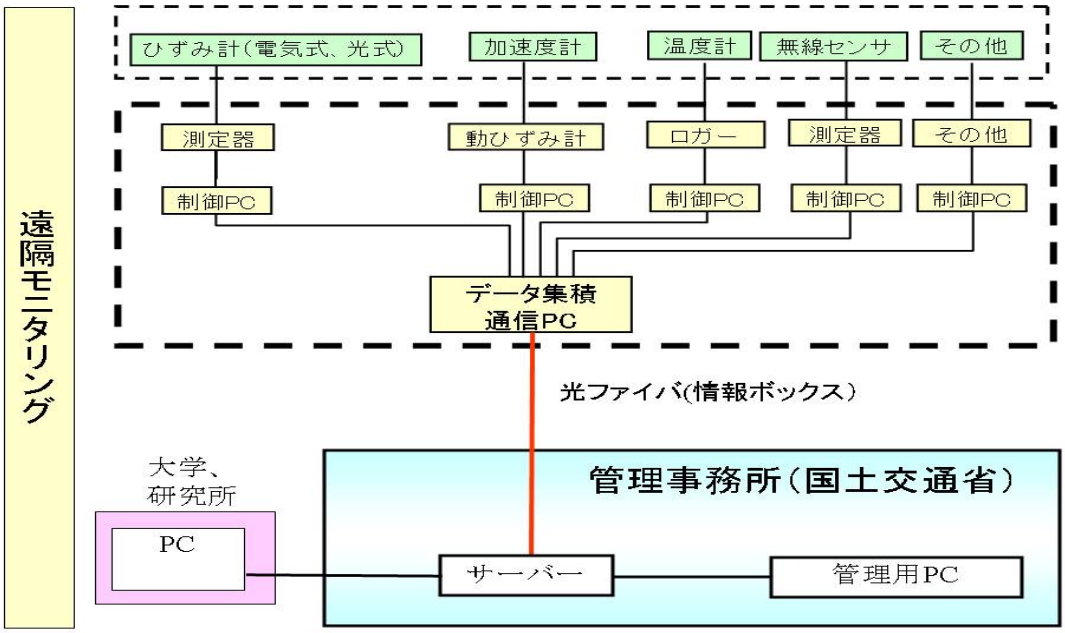


図 4-4.2　遠隔モニタリングシステム

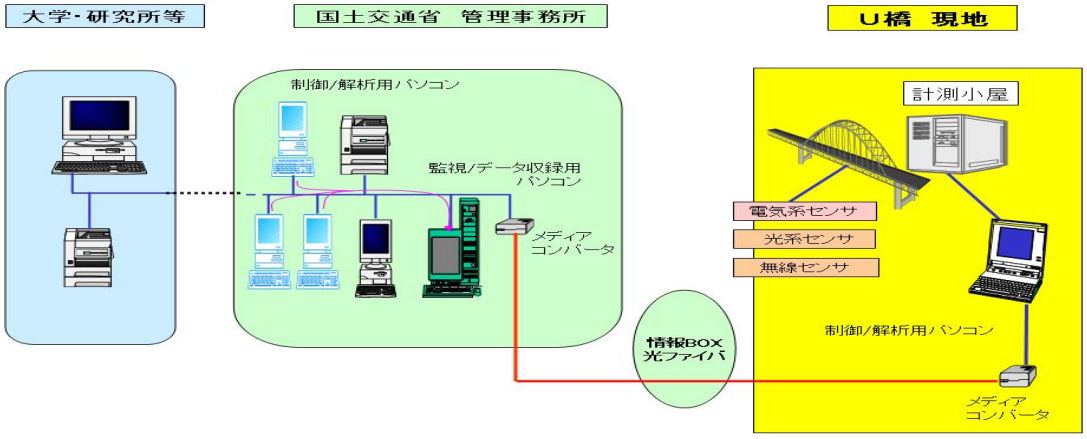


図 4-4.3　遠隔モニタリング概要

4.3　光ファイバ通信による遠隔地での測定

図 4-4.4 に，光ファイバ通信を利用したシステムの詳細を示す.

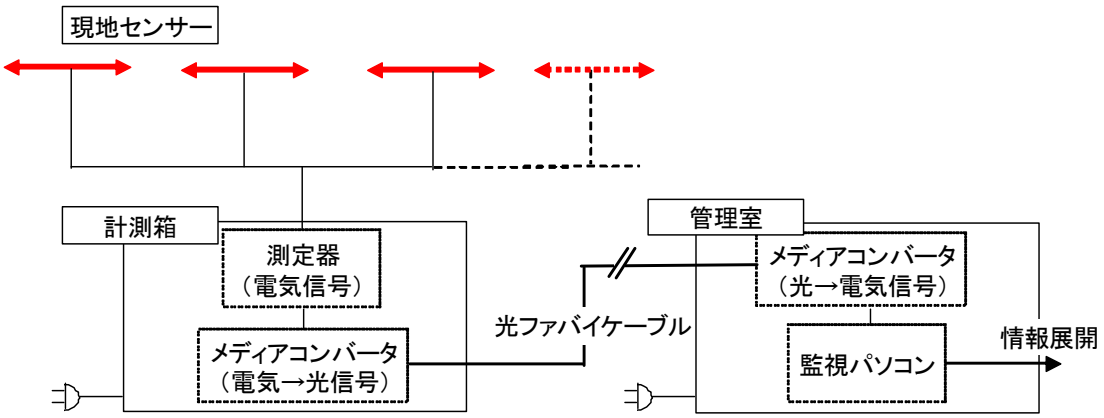


図 4-4.4　光ファイバ通信の詳細

5　管理計画

常時モニタリングでは，大きく二つの事項を目的としている．一つ目の目的は，各種測定項目により推定される荷重特性により，橋梁そのものの損傷度を判定することである．二つ目の目的は，得られた荷重特性の統計データを作成し，交通センサスなどの統計量と組み合わせることで，交通特性の予測精度を向上させることである．

橋梁の損傷度や健全度を評価する場合は，得られる荷重頻度分布により，橋梁全体もしくは床版の疲労損傷度の算定と情報の蓄積を行う．またフランジに発生する応力頻度による損傷度の算定と情報の蓄積，また閾値を超える計測値が発生した場合の異常検知により通常の管理を行う．蓄積されたデータより，損傷予測，損傷加速度を算定し，管理計画へ反映させる．

交通特性の予測精度向上を行う場合は，実際に通行している車両の種別や重量の季節別特性や曜日別特性，昼夜率などの傾向を統計的に求め，　交通センサスなどのデータと照合する．これにより，センサスでは得られなかった荷重の実態を把握することができるようになり，路線に設置された他の橋梁の寿命予測などに反映することができる．

5.1　事前測定

以下では，事前測定により得られた測定データの特性を示すとともに，それより推定される物理量および統計量について概説する．

5.1.1　基準車両

それぞれのセンサから得られる応答値と，橋梁上を走行する車両との相関関係を得るため，あらかじめ荷重や車軸間隔が既知である基準車両を走行させ，初期値を得た．基準車両を**図 4-5.1** に示す．



図 4-5.1　基準車両

表 4-5.1　基準車両の諸元

t	フル載荷（セルフローダ＋ユンボ）			単独（セルフローダのみ）		
	1st	2nd	平均	1st	2nd	平均
前輪	7.750	7.550	7.650	5.800	5.800	5.800
後輪(前)	9.450	9.400	9.425	4.150	4.050	4.100
後輪(後)	8.550	8.700	8.625	3.900	3.850	3.875
計	25.750	25.650	25.700	13.850	13.700	13.775

5.1.2　電気式センサ

(1)　上り車線を走行する車両の応答

上り車線に設置した加速度計の応答を図 4-5.2 に示す．また各支点反力の応答を図 4-5.3 図 4-5.4 に，縦桁の応答および床版ひび割れの応答を図 4-5.5，図 4-5.6 に示す．図 4-5.2 より，基準車両の車軸に対応して，加速度振幅が大きくなっていることがわかる．この加速度の応答位置をトリガーにして，車両進入のタイミングと車軸の区別を行うことができる．またここで得られる衝撃の大きさを，加速度の実効値で求める．これにより，伸縮装置に与える衝撃の大きさを定量化することが可能となる．車軸衝撃の実効値は，車種や軸重量などの統計データとする．

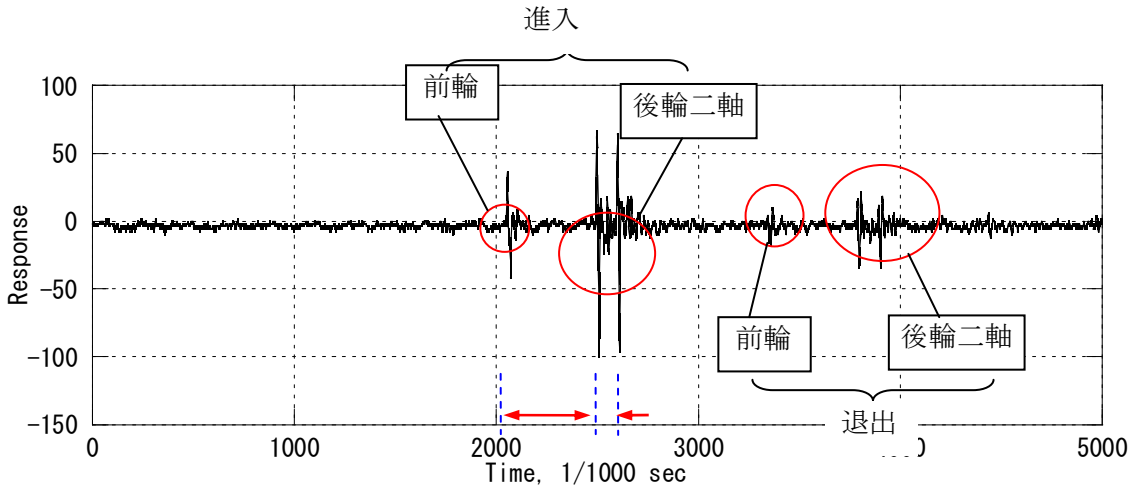


図 4-5.2　A2 端桁加速度

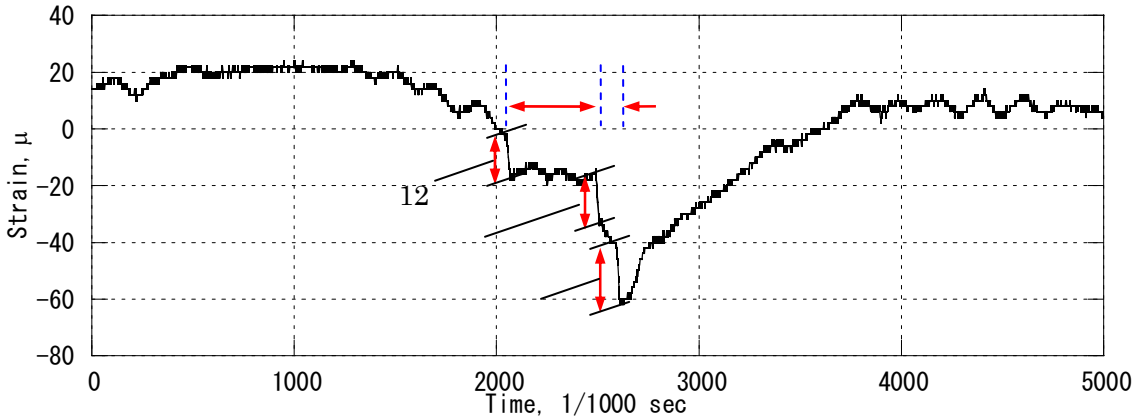


図 4-5.3　G4 支点反力

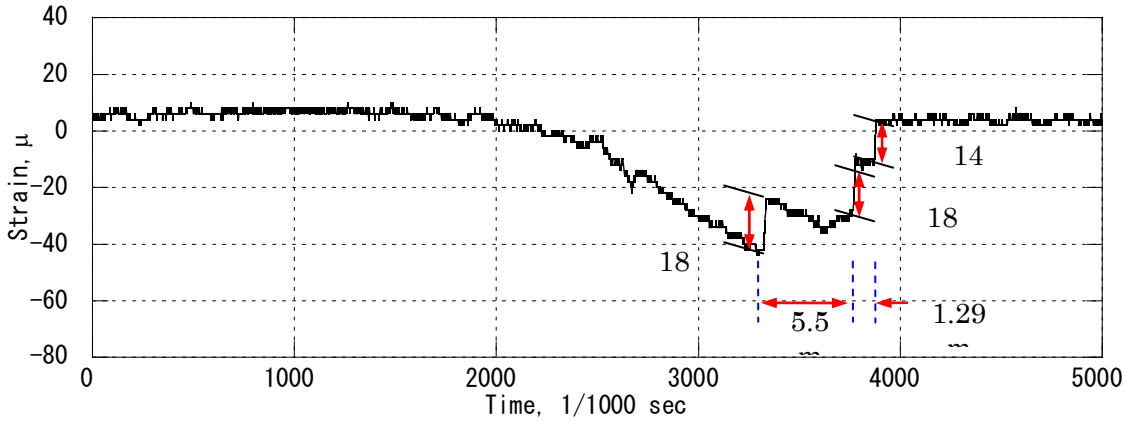


図 4-5.4　G2 支点反力

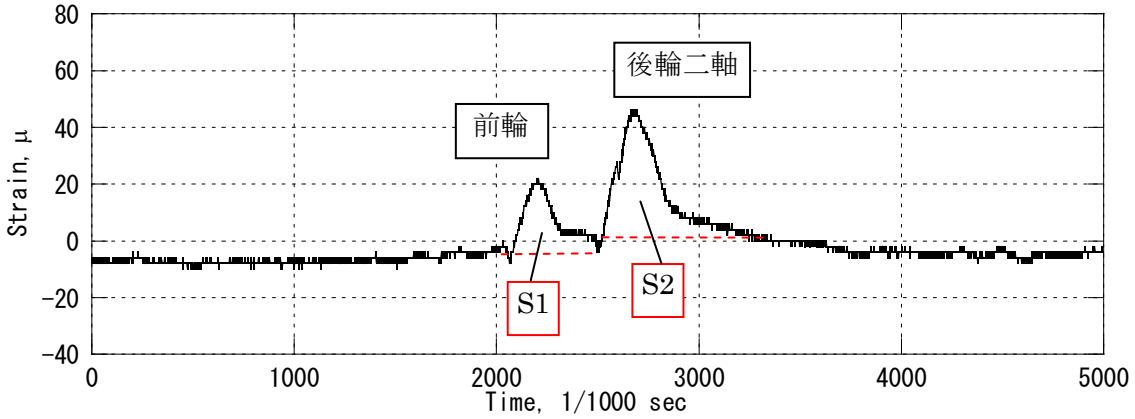


図 4-5.5　縦桁

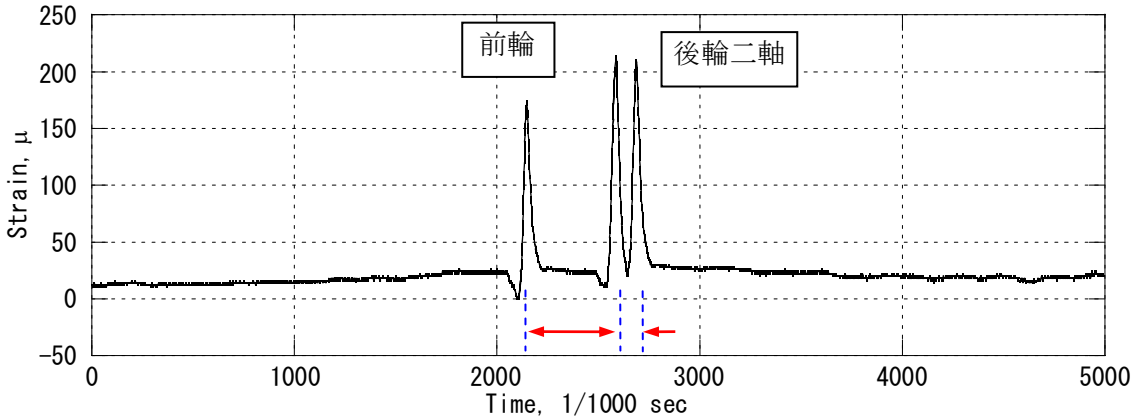


図 4-5.6　床版ひび割れ

図 4-5.3 および**図 4-5.4** より，支点反力の応答値は影響線の重ね合わせとなるため，各車軸が応答の急変箇所と一致する．この急変箇所の数値を読み取ることで軸重推定が可能となる．またこれらの応答値は，進入する車両に対してそれぞれ対称の応答を示すことになるので，車両進入と退出のタイミングを知ることができる．この場合の支間長は 16m であり，この区間を通過する時間を測定することで，車両の速度を推定することができる．また縦桁の応答値である**図 4-5.5** は，それぞれの車軸に対応した応答となり，その面積を算定することで軸重を推定することが可能である．ただし，隣接する車軸の峻別が困難で

あるため，**図 4-5.2** の加速度応答を用いるか，もしくは**図 4-5.6** の床版ひずみの応答を用いることで，車軸を峻別する．

(2)　下り車線を走行する車両の応答

同様に，下り車線を走行する車両の応答を**図 4-5.7**～**図 4-5.11** に示す．上り車線同様，各応答値を用いて車両の軸重，速度，車軸間隔などを推定することができる．

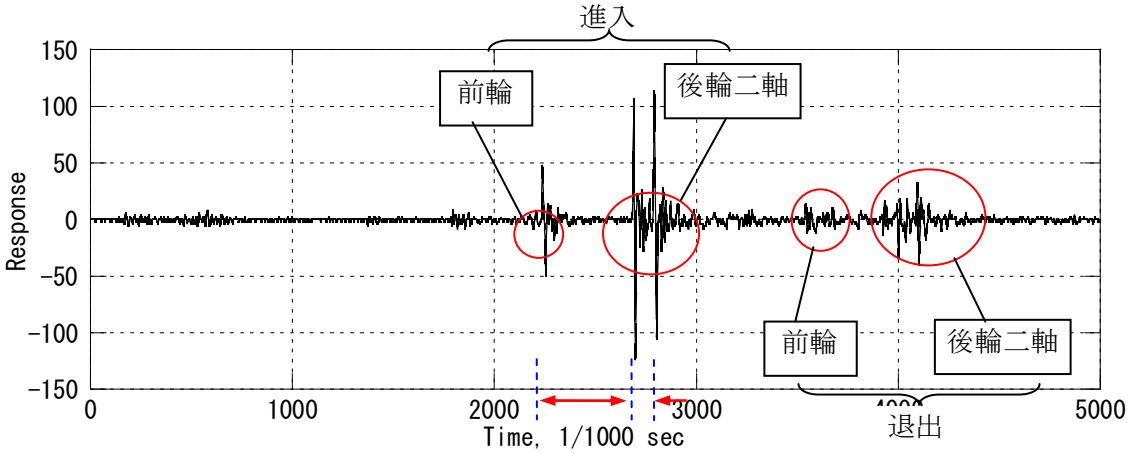


図 4-5.7　A1 端桁加速度

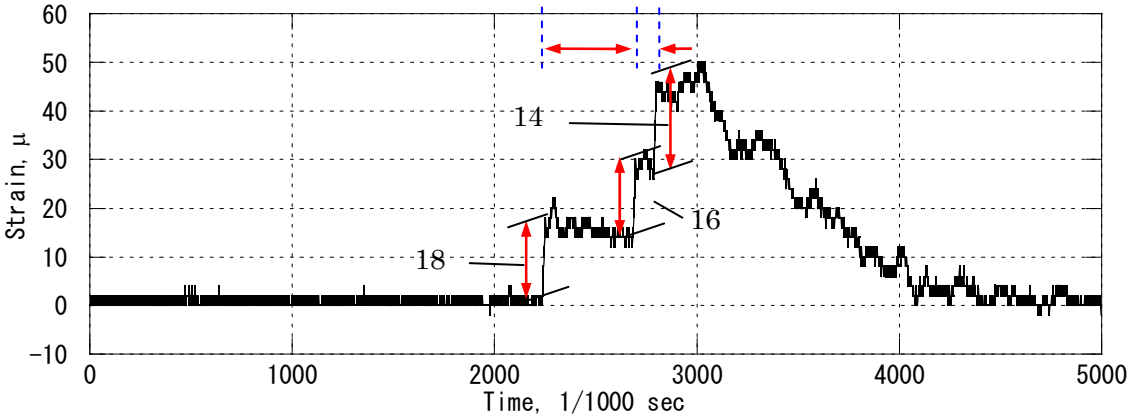


図 4-5.8　G1 支点反力

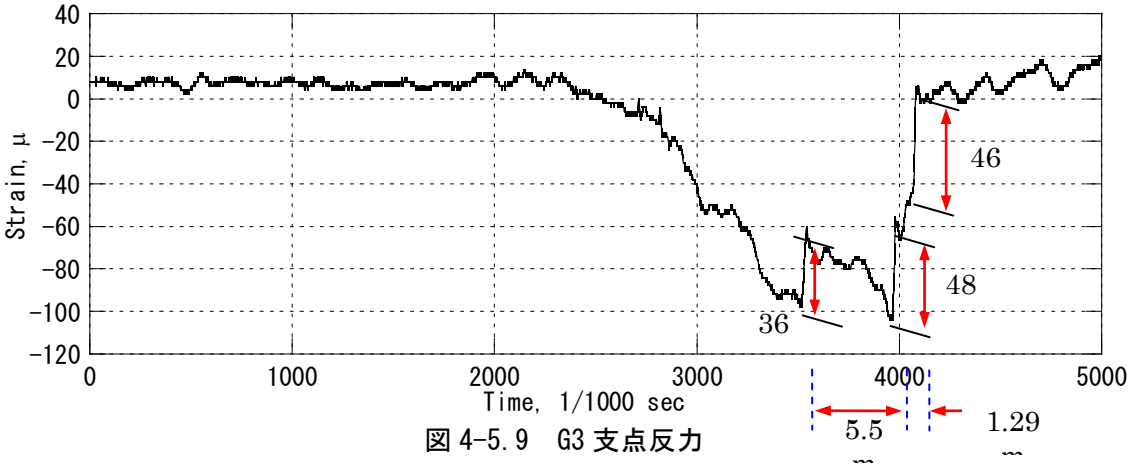


図 4-5.9　G3 支点反力

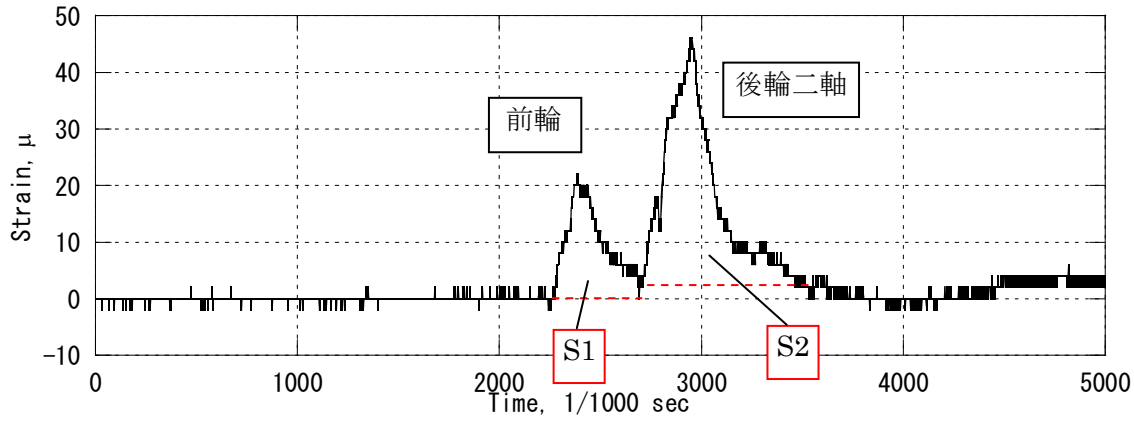


図 4-5.10　縦桁

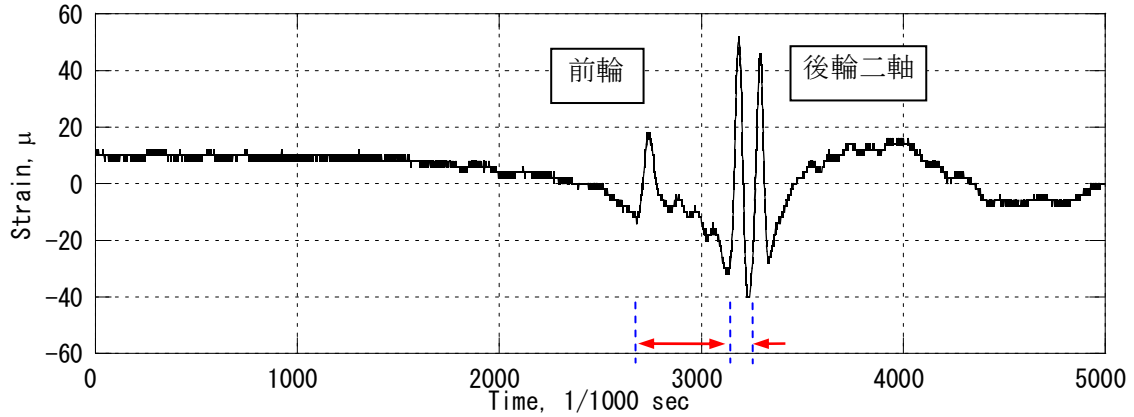


図 4-5.11　ひび割れ

以上より，走行車両の軸重，車種，車軸衝撃の実効値，頻度が明らかとなる．また桁に設置した加速度計より，卓越周波数が明らかとなるため，動的特性の長期的な変動が監視できる．

5.1.3　OSMOS

OSMOS では，非合成桁における曲げひずみの測定を行っている．ここでは，主桁の上フランジおよび下フランジの変位測定を行い，曲率の変動や中立軸位置の変動を監視することを目的としている．フランジ変位より算定された中立軸の位置を**図 4-5.12** に示す．算定される中立軸位置は，車両載荷状態によって若干変化するが，ほぼ一定の値をとることがわかる．この中立軸位は，非合成と完全合成との中間に位置するものである．そのため中立軸位置の変動を捉えることにより，桁の合成状態の変化を捉えることが可能と考えられる．

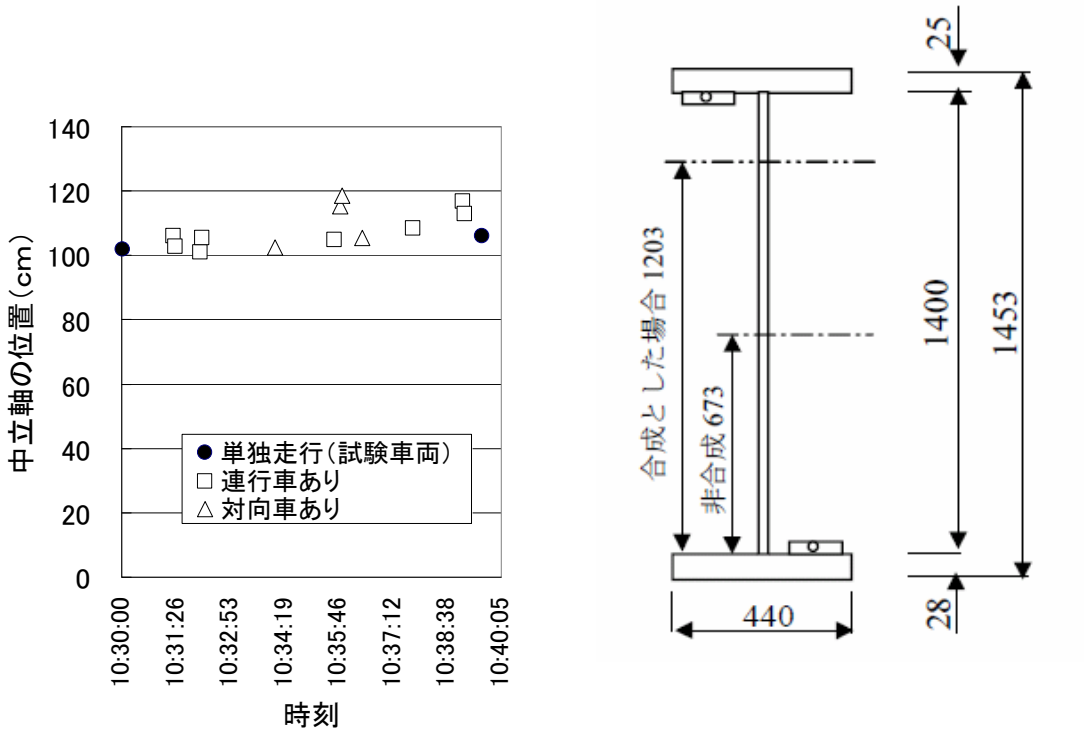


図 4-5.12　中立軸位置の変動

5.2　管理画面のイメージ

以上の測定値から推定される物理量は，主に以下の通りとなる．

1)　軸重頻度
2)　車両走行速度
3)　車種の判別
4)　累積疲労損傷度
5)　中立軸位置
6)　伸縮装置位置での衝撃力（実効値）
7)　衝撃係数の推定値
8)　固有振動数（卓越振動数）

よって管理システムでは，これらの諸数値を表示させることができる出力画面を有する．システムの管理画面イメージを**図 4-5.3** に示す．軸重推定理論から算定させる軸重などは，凡そ一時間のデータを解析処理することで逐次出力することになる．この管理システムでは，疲労損傷度や中立軸など橋梁の直接的な健全度評価のほか，軸重頻度などの統計データは別途蓄積され，路線の交通量推定や荷重の実態推定へ反映される．本システムによセキュリティの確保は，1)通常走行により発生する異常値の通報，2)累積疲労損傷度による警告，3)交通センサスとの併用による「エリア」単位での管理，により行われる．

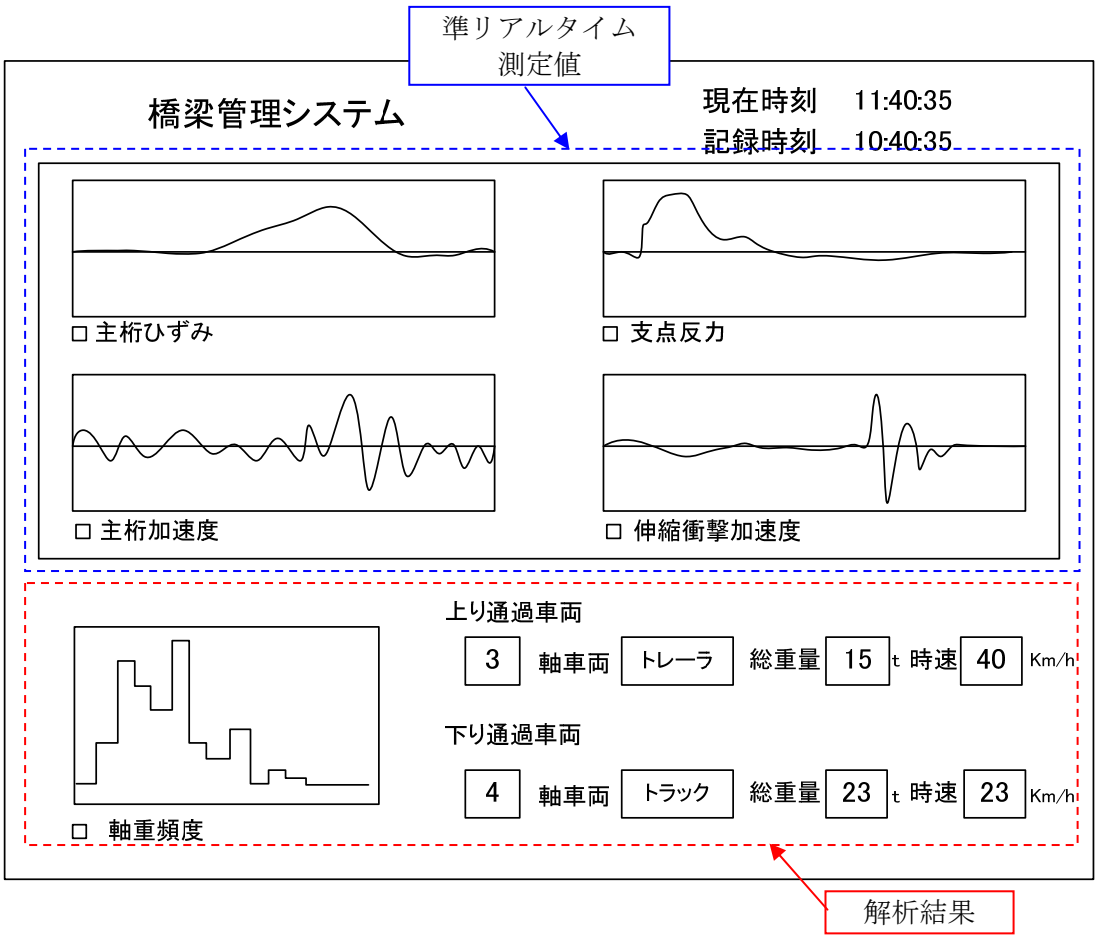


図 4-5.3　管理画面のイメージ