

平成 17 年度

既設構造物の延命化技術に関する研究

報告書

平成 18 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

コンクリートクライシスがマスコミによってセンセーショナルに叫ばれて久しい。これまでコンクリート構造物が永久的構造物でメンテナンスフリーと思われていたことからすると、その意識改革には十分なインパクトがあった。

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。これは、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とその要求による自動車規格の質的容量的向上も同時並行的に図られた。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、いろいろな対策を個別の路線橋梁特性に合わせて講じることを始めようというわけである。合わせて、対応する新技術新工法等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する。

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。SECOM^(R) しませんか？かの長嶋さんが言った言葉は、ホームセキュリティに対するものであるが、我々は公共資産に対し、いわばインフラセキュリティシステムを始めようとするものである。

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 17 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 17 年度の延命化プロジェクトでは、延命化技術に関する技術の検討とモニタリングシステムの構築を中心に実施した。技術の検討では、調査法、補修・補強法等の各種技術について評価を行い、適用範囲や効果・適性等の整理を行った。また部材性能の評価技術に関しても整理を行った。一方、モニタリングに関しては、鋼橋の疲労モニタリングに対するシステムを検討するとともに、コンクリート橋の塩害モニタリングを実施している。これらの結果は技術フロー図としてまとめられ、最終的に補修補強工法選定システムや調査法選定システムの構築を目標とした。（図-1 参照）

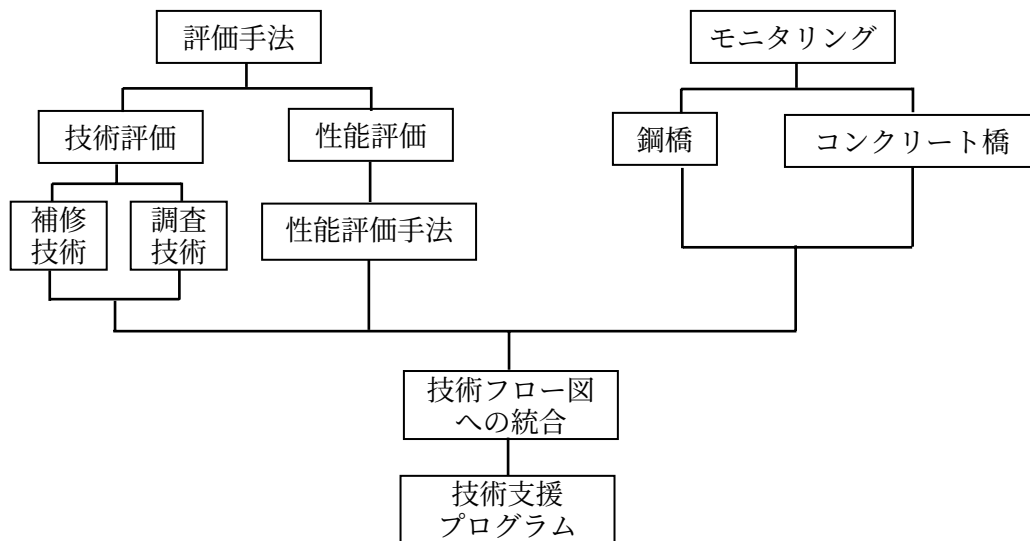


図-1 プロジェクトの全体構成図

プロジェクト研究成果の要約

- 1) 従来手法や光ファイバー等を活用した計測手法による橋梁のモニタリングを行った。通行車両の過積載状態を把握するとともに、これらの遠隔モニタリングシステムの基本を構築した。（システムの実装と実証実験に際しては実橋の補修補強工事を優先しており補修完了後、実施する。）
- 2) 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および検証を行った。
- 3) 延命化に寄与する新工法・新技術（調査技術）を技術フロー図にまとめた。
- 4) 延命化に寄与する新工法・新技術（補修技術）を技術フロー図にまとめた。
- 5) 工法選定システム、調査法選定システムの構築を行った。

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
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 貴士	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
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* ²⁾	大日本コンサルタント(株)	大阪支社技術統括部次長
日紫喜 剛啓	鹿島建設(株)	研究・技術開発本部技術研究所 土木構造・材料グループグループ長

山根 隆志	極東工業(株)	営業本部技術企画課課長
田底 成智	中央復建コンサルツ(株)	保全技術系グループ統括リーダー
太田 弘次	中央復建コンサルツ(株)	保全技術系グループ主任
陵城 成樹	(株)ニュージェック	大阪本社道路グループ 橋梁チームマネージャー
内田 諭	(株)ニュージェック	大阪本社道路グループ 橋梁チーム主任
富山 春男	パシフィックコンサルツ(株)	大阪本社交通技術部構造 2 グループ グループリーダー
能登 有愿	(株)宮地鐵工所	常任参与技術本部技術研究所所長

－ WG2（モニタリング技術）－

奥野 正富*3)	N T T インフラネット(株)	関西支店事業開発本部開発企画部部長
橋村 義人	計測技研(株)	技術部技術課主任
小俣 富士夫	ショーボンド建設(株)	補修工学研究所大阪試験室室長
都志 益一	(株)ソーキ	代表取締役社長
小曲 満	(株)ソーキ	技術部部長
長谷川 伸二	(株)ソーキ	技術統括室室長
塩谷 智基	飛島建設(株)	防災 R&D センター技術研究所研究 プロジェクト推進室主任研究員
蓮井 昭則	(株)間組	技術・環境本部技術研究所技術研究第一部部長
小林 貞之	(株)間組	大阪支店土木部工事課課長
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）－

金好 昭彦*3)	(株)鴻池組	大阪本店土木技術部部長
為石 昌宏	(株)鴻池組	大阪本店土木技術部
小川 光博	青木あすなろ建設(株)	大阪本店技術本部技術部担当課長
鈴木 政直	石川島播磨重工業(株)	橋梁事業部設計部計画グループ 部長代理
松田 泰英	石川島播磨重工業(株)	橋梁事業部設計部大阪基本計画室課長代理
竹田 宣典	(株)大林組	技術研究所土木材料研究室 LCC グループ グループ 長
高橋 謙一	オリエンタル建設(株)	大阪支店開発企画部メンテナンスチーム担当副部長
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
西松 利真	鹿島建設(株)	関西支店土木部設計グループ 課長
木本 輝幸	川田工業(株)	橋梁事業部四国技術部設計二課課長代理
江良 和徳	極東工業(株)	技術本部技術部補修課
大西 豊	佐藤工業(株)	大阪支店土木部門技術グループ グループ 長技術部長

前田 敏也	清水建設(株)	土木技術本部技術第一部 リニューアルグループ 課長グループ 長
利根川 太郎	住友金属工業(株)	土木橋梁エンジニアリングセンター技術室設計チーム課長
檜垣 孝二	住友重機械工業(株)	鉄構機器事業本部技術開発部 西日本技術グループ 課長
丸屋 剛	大成建設(株)	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(株)	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(株)	大阪支店土木部担当部長
早川 健司	東急建設(株)	技術研究所土木研究室
辻子 雅則	飛島建設(株)	大阪支店土木部技術課課長
重金 治彦	飛島建設(株)	大阪支店営業第一部課長
佐古 周一	(株)ハルテック	技術グループ 設計部和歌山チーム主任
張 建東	(株)P S 三菱	大阪支店土木工事統括部技術部開発グループ リーダー
真鍋 英規	(株)富士 P S	関西支店技術部土木技術チームチームリーダー 副部長
室田 敬	三井住友建設(株)	大阪支店土木部技術グループ 部長代理グループ 長

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

総目次

はじめに	ii
平成 17 年度延命化プロジェクトの研究目的と概要	iii
プロジェクト研究成果の要約	iv
プロジェクト参加団体および参加者	iv
総目次	vii
第 1 編 橋梁の現状と劣化の推定	
1 概要	1-1
2 橋梁の現状	1-1
2.1 橋梁の現状	1-1
2.2 橋梁の劣化	1-6
2.2.1 コンクリート橋の劣化現象	1-6
2.2.2 鋼橋の劣化現象	1-7
2.3 部材（床版）の劣化	1-8
2.3.1 床版の劣化過程	1-9
2.3.2 劣化指標	1-10
2.3.3 劣化要因	1-10
2.3.4 劣化による性能の低下	1-13
2.3.5 劣化の予測指標	1-14
2.4 劣化と調査方法および補修方法	1-14
2.4.1 劣化と調査法	1-14
2.4.2 劣化と回復方策	1-15
2.4.3 調査法・工法の選定とシナリオの構築	1-16
3 荷重の実態	1-18
3.1 はじめに	1-18
3.2 橋梁を用いた軸重推定	1-18
3.2.1 軸重推定の概要	1-18
3.2.2 疲労照査の方法	1-19
3.3 U 橋センサスデータから見た荷重特性の推定と疲労に関する考察	1-20
3.3.1 U 橋概要	1-20
3.3.2 交通センサス結果の整理	1-21
3.3.3 U 橋の補強履歴について	1-23
3.3.4 床版の疲労評価フロー	1-23
3.3.5 U 橋における疲労評価	1-24

3.3.6	まとめ、および今後の課題	1-26
3.4	遠隔モニタリングシステム	1-29
第2編 モニタリング技術		
1	概要	2-1
1.1	はじめに	2-1
1.2	モニタリングの目的と位置付け	2-2
1.2.1	目的	2-2
1.2.2	位置付け	2-2
1.3	遠隔常時モニタリングの目的と意義	2-2
2	調査・計測方法	2-4
2.1	調査・計測の概要	2-4
2.2	調査・計測フロー	2-4
3	遠隔モニタリングシステム	2-7
3.1	システム構成	2-7
3.2	遠隔監視システム	2-7
3.3	画像監視システム	2-8
3.4	課題	2-9
4	実橋におけるモニタリング事例	2-10
4.1	U橋の概要	2-10
4.2	モニタリング計画	2-11
4.3	測定技術	2-12
4.3.1	ひずみ計測，加速度計測	2-12
4.3.2	変位計測	2-13
4.4	モニタリングシステム	2-14
4.5	管理計画	2-15
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	3-3
2.2	プレストレストコンクリート構造物の劣化機構	3-4
2.2.1	劣化要因の種別	3-4
2.2.2	劣化過程と対応策	3-4

2.3	鋼構造物の劣化機構	3-5
2.3.1	劣化要因の種別	3-5
2.3.2	劣化過程と対応策	3-6
3	対応策と具体的対策工	3-8
3.1	鉄筋コンクリート構造物への対応策	3-8
3.1.1	対応策の要求性能と評価方法	3-8
3.1.2	要求性能に応じた対策工と具体的工法	3-9
3.2	プレストレストコンクリート構造物への対応策	3-10
3.2.1	対応策の要求性能と評価方法	3-10
3.2.2	要求性能に応じた対策工と具体的工法	3-11
3.3	鋼構造物への対応策	3-11
3.3.1	対応策の要求性能と評価方法	3-11
3.3.2	要求性能に応じた対策工と具体的工法	3-12
4	延命化対策工選定システム	3-14

第 1 編 橋梁の現状と劣化の推定

1	概要	1-1
2	橋梁の現状	1-1
2.1	橋梁の現状	1-1
2.2	橋梁の劣化	1-6
2.2.1	コンクリート橋の劣化現象	1-6
2.2.2	鋼橋の劣化現象	1-7
2.3	部材（床版）の劣化	1-8
2.3.1	床版の劣化過程	1-9
2.3.2	劣化指標	1-10
2.3.3	劣化要因	1-10
2.3.4	劣化による性能の低下	1-13
2.3.5	劣化の予測指標	1-14
2.4	劣化と調査方法および補修方法	1-14
2.4.1	劣化と調査法	1-14
2.4.2	劣化と回復方策	1-15
2.4.3	調査法・工法の選定とシナリオの構築	1-16
3	荷重の実態	1-18
3.1	はじめに	1-18
3.2	橋梁を用いた軸重推定	1-18
3.2.1	軸重推定の概要	1-18
3.2.2	疲労照査の方法	1-19
3.3	U 橋センサスデータから見た荷重特性の推定と疲労に関する考察	1-20
3.3.1	U 橋概要	1-20
3.3.2	交通センサス結果の整理	1-21
3.3.3	U 橋の補強履歴について	1-23
3.3.4	床版の疲労評価フロー	1-23
3.3.5	U 橋における疲労評価	1-24
3.3.6	まとめ，および今後の課題	1-26
3.4	遠隔モニタリングシステム	1-29

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つて、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。国全体に熱い時代があった。

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 21 歳の青年技師・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、荒廃溪流、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、橋梁の現況を俯瞰するとともに、劣化の実態を把握し、適切な調査方法と補修方法の選定に至る手法について概説する。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。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、U 橋現地に構築中の遠隔常時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。

2 橋梁の現状

2.1 橋梁の実態

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～図-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⁾。

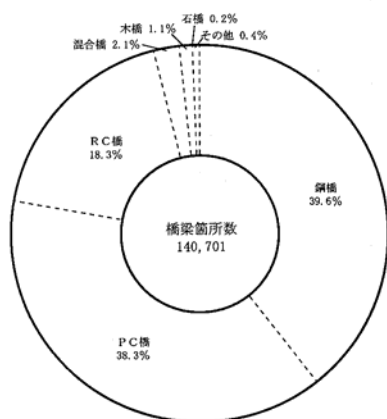


図-1 橋種別橋梁箇所数比率

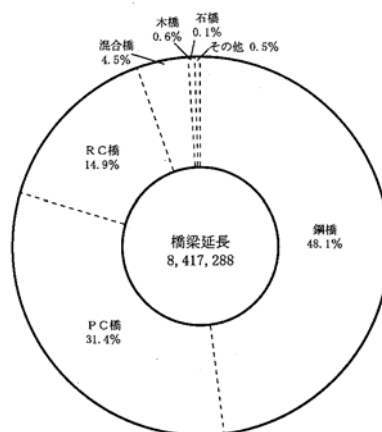


図-2 橋種別橋梁延長比率

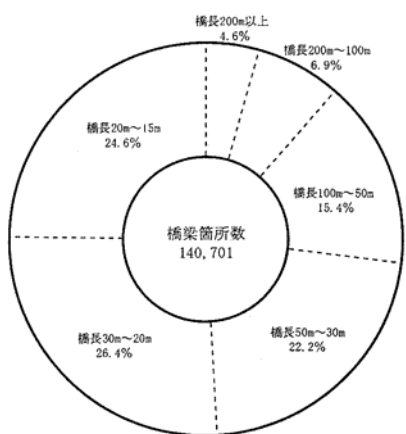


図-3 橋梁延長別箇所数比率

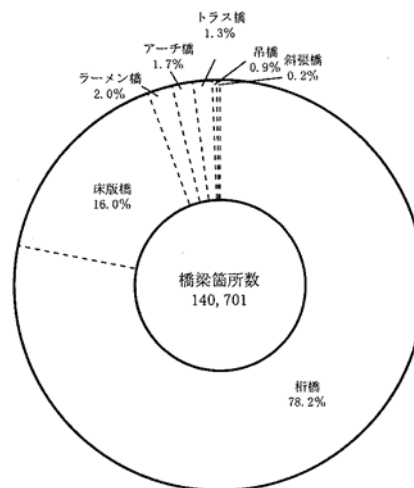


図-4 橋梁構造形式別橋梁箇所数比率

現在供用中の総道路橋数と建設数の推移は、**図-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-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⁾

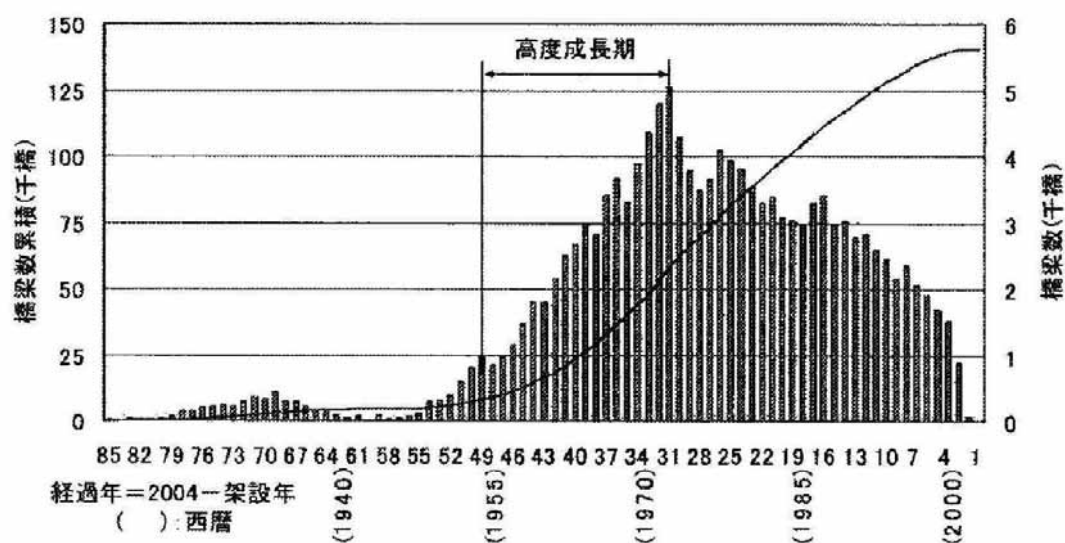


図-5 総道路橋数と建設数の推移

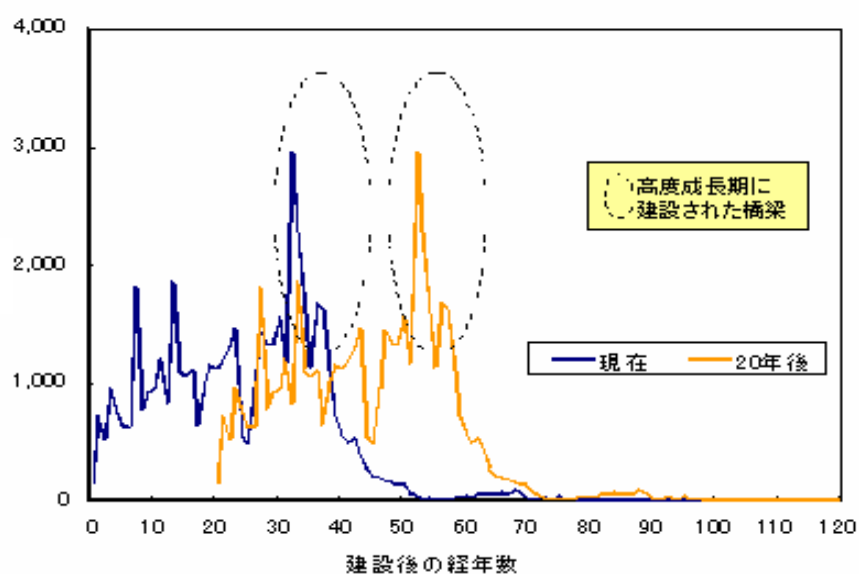


図-6 橋梁群の平均年齢

近畿地方整備局管内の全橋梁の架設竣工年を図-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-8 参照) 図中の最も高齢化した部分を詳述した図が、図-9 である。

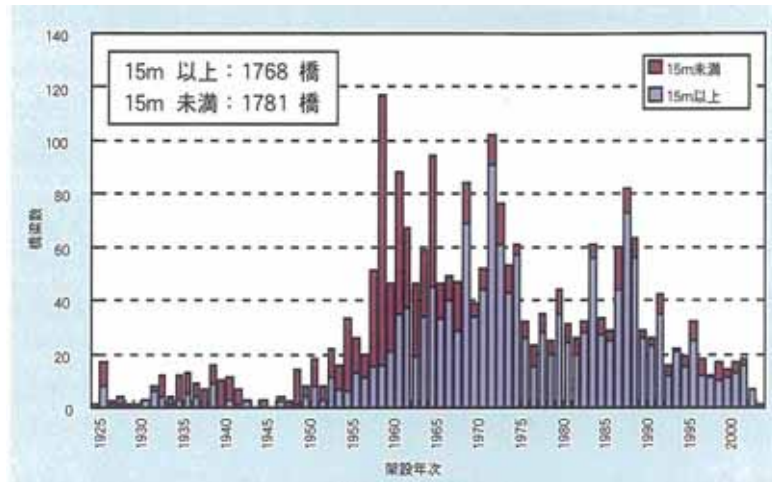


図-7 橋梁の架設数と竣工年⁴⁾

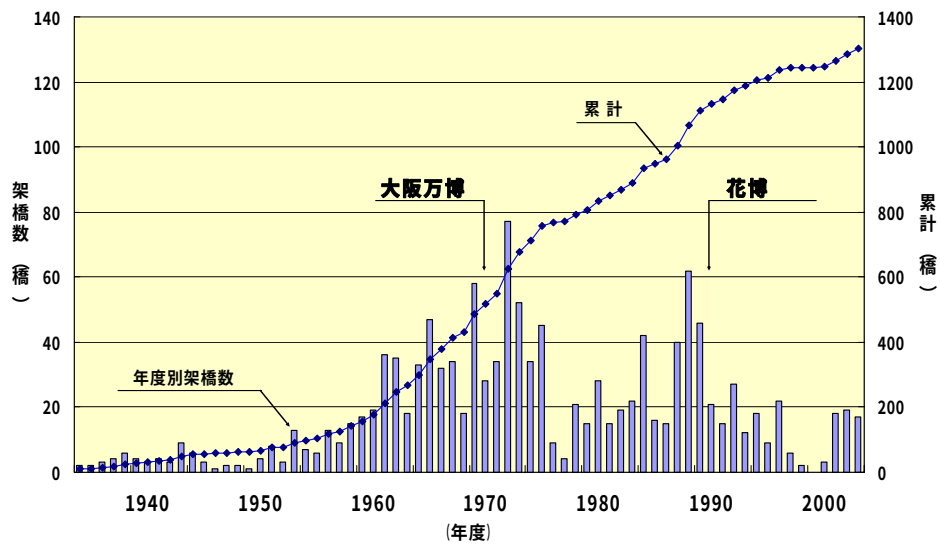


図-8 イベント情報と架橋数

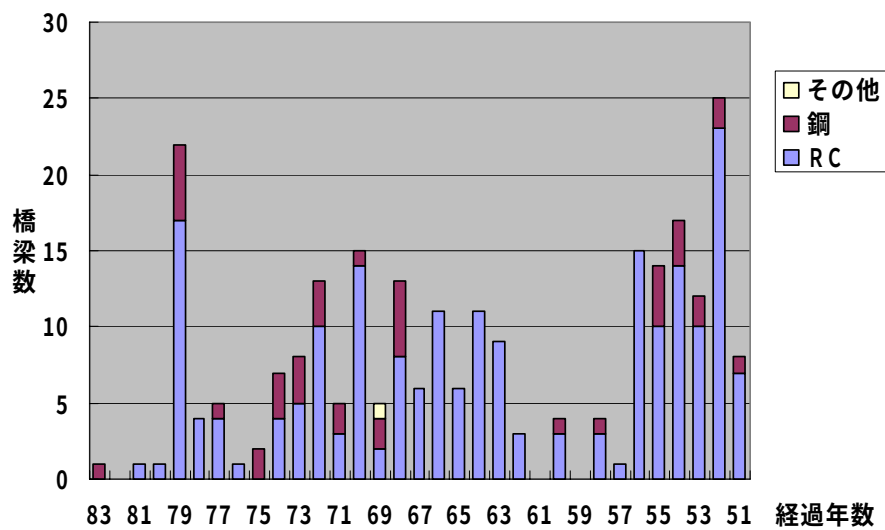


図-9 架橋数の内訳

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-10 参照)²⁾

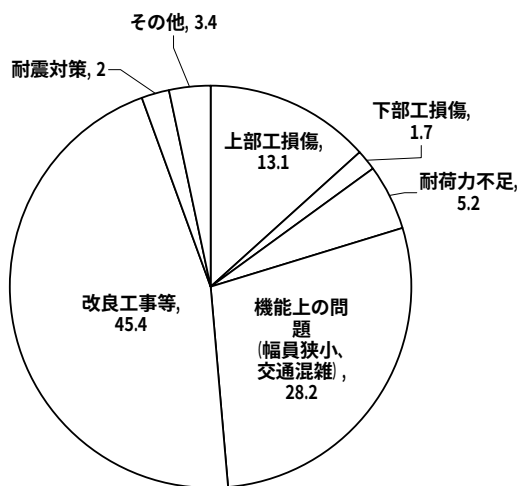


図-10 架け替えの理由

また、上部工に関する架け替えの理由は図-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、全形式を通じて床版の損傷が顕著であるといえる³⁾。

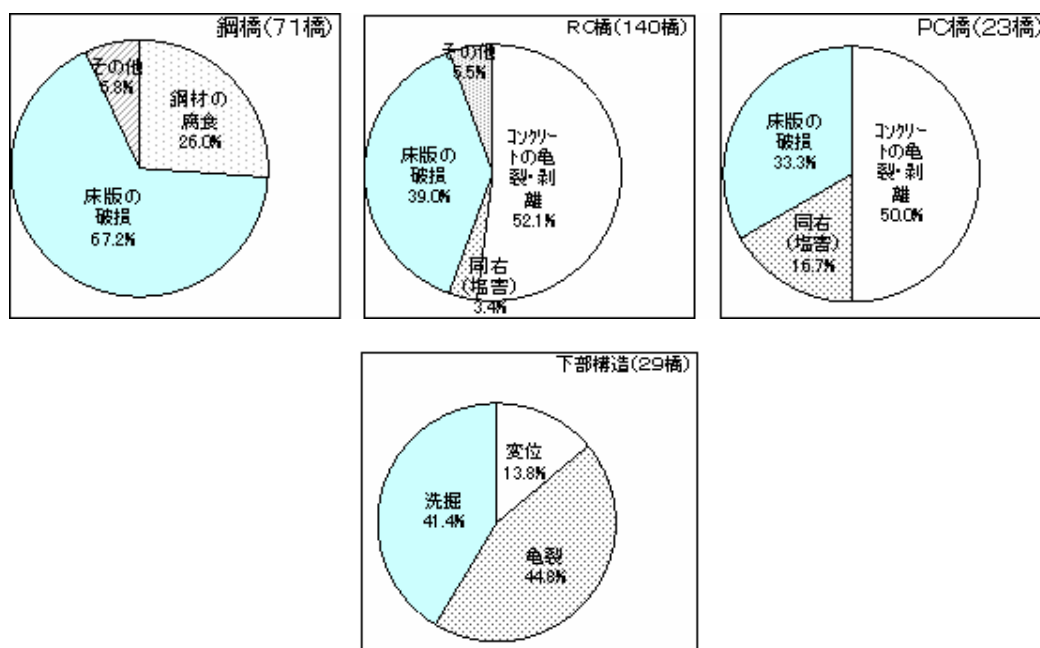


図-11 橋梁の架け替え理由

[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「繫 Kei」Vol.13，平成 18 年 1 月

2.2 橋梁の劣化

2.2.1 コンクリート橋の劣化現象

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．床版の疲労損傷は，鋼橋・コンクリート橋に共通する重要な項目であるので，節を設けて詳細を後述する．

(1) 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．

(2) 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) 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。

2.2.2 鋼橋の劣化現象⁶⁾

鋼橋の劣化現象には、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。ここでは、鋼橋特有の鋼材の疲労および鋼材の腐食に関して、劣化の特徴について整理する。詳しくは文献6)を参照されたい。

(1) 鋼材の疲労破壊

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。最終的には、応力集中した部分が静的強度を超えて破壊に至る。しかし一般に、鋼橋に生じる応力の大きさは鋼材の静的強度に比べてかなり小さい場合が多い。よって微小な疲労亀裂の発生が部材や構造物全体の崩壊に直ちに繋がるものではなく、亀裂発生を早期に発見し、初期段階で対策を講じることにより、構造物全体の安全性を確保することができる。

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。すなわち継手部分などの複雑な形状をもつ部分は、応力集中しやすく、得に疲労損傷の影響を受けやすいといえる。また溶接部分も疲労損傷を受けやすく、溶接欠陥や鋼材の残留応力なども疲労破壊に大きな影響を及ぼす要因である。鋼材の疲労強度は高強度鋼になるに従い向上するが、溶接継手部の疲労強度は使用する鋼材の静的強度にほとんど関係せず、継手の形式によっては高強度鋼の方が低くなる場合もある。

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。

鉄道橋では、比較的設計荷重に近い荷重が繰り返し載荷されるため、部材の疲労損傷を重要な限界状態の一つとして設計が行われる。鉄道構造物設計標準では、各種継手について分類を行い、それぞれについて疲労設計許容応力を定めている。また疲労検算を行っている鉄道橋の主要部材については、疲労損傷が発生した事例はほとんどない。

また文献7)では、道路橋に関して疲労の主な原因は活荷重であり、あるレベル以下の応力範囲は疲労損傷に対して影響が小さいこと、また疲労損傷が応力範囲の3乗とその繰り返し

し数に比例することなどを勘案し、疲労損傷に関する重要事項として以下の点を指摘している。

- ・ トラックの通行台数が重要なこと
- ・ トラックの重量が2倍であれば被害が8倍（2の3乗）になること
- ・ 死荷重と活荷重のバランス、影響線の長さから、短い橋梁ほど疲労が激しくなること
- ・ 長い橋梁については、主部材に疲労の問題は少なく、床組に注意すべきこと等

さらに疲労の原因を、特に過積載のトラックによる活荷重であると指摘し、どの程度の重量のトラックが何台程度走っているか知ることが、疲労損傷を考える上で重要であると指摘している。

(2) 鋼材の腐食劣化⁶⁾

腐食とは、一般に金属が外的要因によって化学的あるいは電気化学的に侵食される現象、すなわち酸化還元反応をいう。鋼材の腐食は水分と酸素供給により引き起こされるが、特にマクロセルと呼ばれる電子循環機構が構成されると、著しく反応が進展する。マクロセルとは、鋼材の異なる部分において、鉄のイオン化によりアノード部とカソード部という電位の異なる部位が発生し、アノード部からカソード部に電子の供給が起きる機構である。

腐食進展の程度は、構造物の環境や種類、また部位などにより大きく左右される。鋼橋の防食には、主に塗装が行われる。塗装が正常に機能している場合には、鋼材が腐食する心配はないが、塗装自体も経年劣化するため、ある周期で塗り替える必要がある。最近では高機能塗料の開発などにより、腐食環境の激しい場所では重防食塗料系（ジンク、エポキシ樹脂）、高耐候性塗装系（ウレタン、フッ素、シリコン他）が使用されるようになり⁶⁾、塗装塗り替えの周期が伸びつつある。

腐食が生じると部材断面が減少し、強度および剛性が低下する。局部腐食や孔食が生じた場合には、腐食部分に応力集中が発生し、疲労強度の低下に繋がる。また腐食が進展している環境下での疲労強度は、通常の疲労強度よりも小さくなる。また静的な応力が発生している部材に腐食が生じると、応力と腐食の相互作用により亀裂が発生したり、破断したりすることもある。

2.3 部材（床版）の劣化

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。

コンクリート構造物の疲労による劣化・損傷事例は、道路橋床版を除いてほとんどない実態に鑑み、本稿では RC 床版の疲労に絞って記述するものとする。

2.3.1 床版の劣化過程

道路橋 RC 床版の疲労損傷メカニズムは、松井らによる輪荷重走行試験機による疲労実験、および理論解析によって解明された。それによると、損傷機構は以下に説明する 5 段階のプロセスによって進むようである（図-12）。

- (1) 潜伏期（橋軸直角方向に初期ひび割れ）

まず、主桁によって拘束された床版コンクリートにおいて乾燥収縮が進行し、橋軸方向に引張りひずみが発生する。橋軸方向に十分な鉄筋が配置されていない場合、乾燥収縮ひび割れが発生する。

- (2) 進展期（床版下面に曲げひび割れ網の形成、上面にもひび割れ）

潜伏期に発生した橋軸直角方向のひび割れによって床版に異方性が発現し橋軸方向への荷重分配性能の低下を招く。これによって、主鉄筋方向での荷重分担率

が増加するため、活荷重の載荷によって床版下面では橋軸方向にもひび割れが発生する。また、床版上面ではねじりモーメントが繰返し作用し橋軸直角方向のひび割れが支持桁付近から床版中央へと進展する。

- (3) 加速期（雨水の浸透）

RC 床版とアスファルト舗装の間に防水層を設けていない場合、舗装には防水性は期待できないうえ透水性が高く、保水性が高い。上面あるいは貫通ひび割れが存在する床版上でアスファルトが雨水で飽和状態となり保水状態が続くと、ひび割れに水が浸透し、遊離石灰を下面に沈着させる。

- (4) 加速期（橋軸直角方向のひび割れにおけるひび割れ面相互の摩耗）

橋軸直角方向の貫通ひび割れが形成された状態で走行輪荷重の載荷が続くと、ひび割れ面にせん断力やねじりモーメントが交番しながら繰返し作用する。すると、ひび割れ面相互には上下方向ならびに水平方向のこすり合わせの動きが起こり、ひび割れ面の摩耗が進行しながら、徐々にひび割れ幅が大きくなる。このような状況下では橋軸方向への荷重分配効果が低下し、床版は板構造から橋軸直角方向に梁を並べた状態へと変化する。さらにコンクリートが徐々に粉砕されて、骨材化現象が現れると推定される。

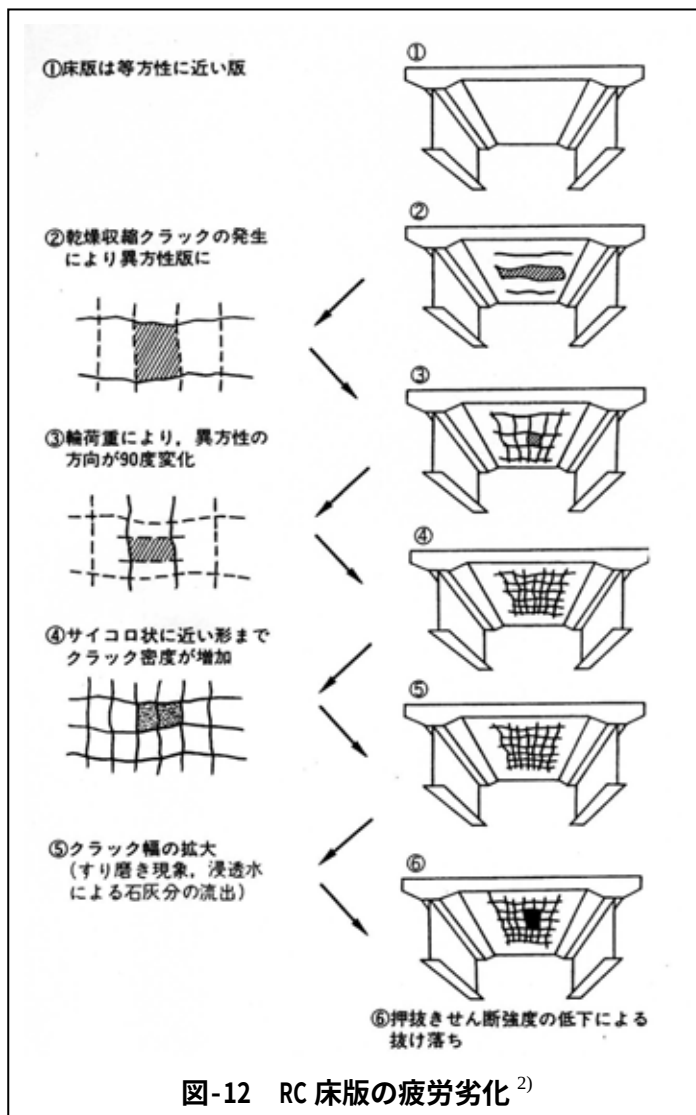


図-12 RC 床版の疲労劣化²⁾

(5) 劣化期（破壊，陥没）

床版が橋軸直角方向に梁状化した結果，せん断強度の不足から，ついには耐荷力を喪失する．実橋では舗装により床版上面の破壊がわからないので，その後も自動車が走行すると，破壊部位のコンクリートが細かく割れて細片の落下が起こり，ついにはひび割れで囲まれた床版の一部が陥落する．

2.3.2 劣化指標

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）．

表-1 RC 床版の疲労劣化指標

劣化過程	外観の変状 （ひび割れの 方向性，密度）	外観の変状 （漏水，遊離 石灰の状況）	ひび割れの挙動 （幅，深さ，開 閉量，段差量）	路面の状況	たわみ
潜伏期	◎	○	△	△	△
進展期	◎	○	△	△	△
加速期	○	◎	○	○	○
劣化期	○	◎	◎	◎	◎

2.3.3 劣化要因⁵⁾

道路橋の RC 床版は，支間長に比して厚さの薄い構造であり，変動の激しい輪荷重を直接支える部材であるため，荷重の繰返しがもたらす疲労の影響による性能低下が顕在化する代表的な構造物といえる．

床版設計上は，曲げモーメントが支配的であることから，国内外を問わず弾性薄板曲げ理論に基づく許容応力度設計法による照査が行われてきており，繰返し荷重に対しても十分に安全との認識があった．しかしながら，昭和 40 年代後半から，床版下面のひび割れ発生とコンクリートはく落が認められるようになり，やがて鉄筋が健全であるにも係わらずコンクリートのみが陥没する現象が発生した．現象の解明に向けて道路を管理する諸機関による原因究明がなされた結果，陥没に至った原因と床版の疲労機構がおおよそ解明された．床版の疲労の主たる原因は，いうまでもなく過積載車両の走行であるが，表-2 に示した要因が複合して劣化の急激な新興と最終的に陥没に至ったものと考えられる．

(1) 設計に関する要因⁴⁾

昭和 55 年以前の基準は，その損傷メカニズムが必ずしも解明されていなかった時期に作成されたが，その後，実橋損傷実態や実験成果を踏まえて改訂されてきた．

1956 年の「鋼道路橋設計示方書」の段階から、床版は版としての考え方で設計されるようになったが、配力鉄筋方向の曲げモーメントや必要版厚への配慮不足などから、交通量増大や大型車の通行により損傷が著しくなった。その後、版厚や曲げモーメント式の検討や実験が行われ、示方書に採り入れられてきた。

現在の RC 床版は版という考え方で設計され、2 方向に配筋したうえで、鉄筋の応力度を 120N/mm^2 程度に低く抑えることと、床版厚を厚くすることにより曲げモーメントによるコンクリートの引張応力度を抑え、せん断力に抵抗することが基本となっている。合成桁橋では、RC 床版が劣化した場合、取替えなどへの対応が困難になるため、1970 年中頃から単純桁、連続桁共に合成桁橋が採用されなくなった。

表-3 は、道路橋 RC 床版の鉄筋の許容応力度、最小床版厚、配力鉄筋の量に着目し、設計基準の変遷をまとめたものである。

表-2 陥没に至った道路橋の RC 床版の疲労劣化の要因

床版疲労の原因		解 説
使用条件	過積載車両の走行	昭和 30 年代の高度経済成長に伴う交通量の飛躍的な増大と、積載制限を超過する車両の影響を受けた。
設 計	薄い床版厚	昭和 39 年以前の鋼道路橋設計示方書により設計施工された RC 床版は、床版厚が 180mm 程度と薄く、このため大型車両の走行により曲げひび割れが発生しやすかった。
	主桁高速の影響	RC 床版は、合成桁はジベルにより、非合成桁はスラブ止めにより固定され主桁と拘束され、乾燥収縮によるひび割れが潜在的に発生しやすかった。
	主鉄筋に比べて少ない配力筋	昭和 39 年以前の鋼道路橋設計示方書により設計施工された RC 床版は、配力筋が主鉄筋の 25% 程度であり、主筋方向（橋軸直角方向）の曲げひび割れが発生しやすかった。
施 工	コンクリートの品質	疲労損傷した床版の施工は、コンクリート用の粗骨材が砂利から碎石へ移行した時期に一致し、ワーカビリティを得るために練り混ぜ水の割り増しとセメントの増量を必要としたことから、結果としてモルタル分の多いコンクリートとなり、乾燥収縮によるひび割れを生じやすかった。
環 境	雨水の浸透	乾燥収縮や荷重作用により発生したひび割れが貫通すると、路面からの浸透水によりひび割れ面の摩耗が促進するとともに、RC 床版上縁の圧縮側コンクリートを分離させる骨材化現象をもたらすことから、さらに疲労が促進された。

表-3 道路橋 RC 床版の設計基準の変遷⁴⁾

基 準	鉄筋の許容応力度 (kgf/cm ²)	最小床版厚 (cm)	配力鉄筋の量 (L:床版支間)
1886 年 8 月 国県道の築造基準 (内務省訓令第 13 号)	規定なし	規定なし	規定なし
1919 年 12 月 道路構造令及び街路構造令 (内務省令)			
1926 年 6 月 道路構造に関する細則案 (内務省土木局)			RC 断面の 2%以上 または RC 有効断面 の 3%以上
1939 年 2 月 鋼道路橋設計示方書(案) (内務省土木局)			
1956 年 5 月 鋼道路橋設計示方書 (日本道路協会)	規定なし	有効厚 11 以上	主鉄筋断面の 25% 以上
1964 年 6 月 鋼道路橋設計示方書 (日本道路協会)	SSD39:1800		
1967 年 9 月 鋼道路橋一方向鉄筋コンクリート床 版の配力鉄筋設計要領 (建設省道路 局長通達)			1400
1968 年 5 月 鋼道路橋の床版設計に関する暫定基 準 (案) (日本道路協会)			
1971 年 3 月 鋼道路橋の鉄筋コンクリート床版の 設計について (建設省道路局長通達)	下の曲げモーメン ト式より算出 M=0.8(0.1L+0.04)P		
1973 年 2 月 道路橋示方書 (日本道路協会)			
1973 年 4 月 特定路線にかかる橋高架の道路等の 技術基準 (建設省都市局長, 道路局長通達)			下の曲げモーメン ト式より算出 L>2.5m M=0.8(0.1L+0.04)P K ただし K>1.0
1978 年 4 月 道路橋鉄筋コンクリート床版の設 計, 施工について (建設省企画課長)	許容応力度 1400 に 対して 200 程度余裕 を持たせる	K ₁ k ₂ (3L+11) K ₁ :交通量係数 K ₂ :付加モーメント係数	M=0.8(0.1L+0.04)P
1980 年 2 月 道路橋示方書 (日本道路協会)			
1990 年 2 月 道路橋示方書 (日本道路協会)			
1994 年 2 月 道路橋示方書 (日本道路協会)			
1996 年 2 月 道路橋示方書 (日本道路協会)			

(2) 施工に関する要因

- ・ コンクリートの品質

1960 年代の粗骨材の砂利から碎石への移行 → 練り混ぜ水の割り増しとセメントの増量→乾燥収縮ひび割れを生じやすいコンクリート

(3) 使用条件に関する要因

- ・ 通過交通量

昭和 30 年代の高度経済成長に伴う交通量の飛躍的な増大

- ・ 大型車重量

車両大型化による影響，積載制限を超過する車両の影響

- ・ 大型車走行位置

(4) 環境条件に関する要因

- ・ 雨水の浸透

乾燥収縮や荷重作用によるひび割れの貫通 → 浸透水によるひび割れの摩耗促進
→ 上縁圧縮側コンクリートを分離させる骨材化現象

(5) 荷重に関する要因

- ・ 過積載

2.3.4 劣化による性能の低下

(1) 疲労の症状

RC 床版の疲労劣化に関して，劣化段階に応じた症状をまとめると表-4 のようになる。

(2) 性能低下の評価

また各劣化段階に応じた性能低下を表-5 にまとめる。

表-4 RC 床版の疲労の症状³⁾

劣化過程	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．

表-5 構造物の外観上のグレードと標準的な性能低下⁵⁾

構造物の外観上のグレード	安全性能	使用性能	第三者影響度 美観・景観
状態Ⅰ（潜伏期）	—	—	—
状態Ⅱ（進展期）	—	—	—
状態Ⅲ（加速期）	せん断剛性の低下 ひび割れのスリット化, 角落ち	—	美観の低下 ひび割れ 遊離石灰
状態Ⅳ（劣化期）	耐荷力の低下 ひび割れの貫通 雨水の浸透 鋼材腐食	疲労進行による路面の損傷 路面の亀裂・陥没	コンクリート表面の陥没 第三者への影響はく離

2.3.5 劣化の予測指標

(1) 定性的な予測指標

- ・ 劣化過程を潜伏期, 進行期, 加速期, 劣化期に分け, 各期間の長さを予測
(点検で得た床版下面の状態に, 疲労の進行に影響する要因を考慮して, 予測する)
- ・ 劣化進行に影響する要因を考慮して適度な安全度を見込む
- ・ 劣化状況が予測と異なる場合 → 原因究明 → 劣化予測の修正, 維持管理計画の変更

(2) 定量的な予測指標

コンクリートの疲労破壊は, 静的破壊と同様に骨材とマトリックス間のボンドひび割れやモルタルひび割れの発達伝播によって生じる. 繰返し作用応力 (静的強度に対する比, $S_{\max}/S_0$) と破壊までの繰返し回数 N (対数表示) の関係は近似的に直線で表される (S-N 線図). またランダム荷重下における疲労の簡便な取扱いとしてマイナー則と呼ばれる仮定が適用され, 疲労破壊は累積損傷度が 1 となったときに生じると考えられている.

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. ただし, マイナー則は金属材料に対しては実用的には適用できるが, コンクリートに対してそのまま適用することには問題があり, 修正が試みられている.

2.4 劣化と調査方法および補修方法

2.4.1 劣化と調査方法

(1) 疲労対策に有効な点検方法 (目視レベル)

床版の点検項目は, 目視による外観変状の観察が主体となる. 床版の疲労を評価および判定するための点検項目の標準を表-6 に示す.

(2) 疲労対策に有効な調査・試験方法 (詳細調査レベル)

RC 床版の詳細点検は, 主として目視による点検では劣化度の判定が困難な場合, あるいは床版が異常な劣化進行を示した場合に, 劣化程度の詳細な評価, 劣化原因の検討, その後の進行並びに補修・補強方法の検討などに関する詳細な資料を得ることを目的として実

施する。

表-6 点検方法⁵⁾

点検項目		点検方法
外観の変状	ひび割れ状態： (方向性、密度、幅、角欠けの有無) 漏水、遊離石灰、コンクリートの色合い	目視、簡単な計測、写真撮影
	不良音	打音法
路面の状態	亀裂、陥没の有無	目視、写真撮影
ひび割れの挙動	深さ、開閉量、段差量	超音波伝播速度、コンタクト ゲージ等

表-7 調査・試験方法⁵⁾

点検項目		点検方法	点検の目的
変位に 関するもの	たわみ	載荷試験	劣化度の評価
	ひび割れの挙動	載荷試験	劣化度の評価
	ひび割れの深さ	超音波伝播速度計測、コア採取	劣化度の評価
材料に 関するもの	コンクリート強度	超音波伝播速度計測、打撃法、 コア強度試験	劣化進行の予測
	コンクリートの品質	採取コアによる室内試験	劣化進行の予測
	コンクリート断面	コア採取、電磁波調査など	劣化進行の予測
	配筋の状況	電磁波調査、はつり調査	劣化進行の予測
交通特性に 関するもの	荷重実態	交通量調査、車両重量の計測な ど	劣化進行の予測

2.4.2 劣化と回復方策

それぞれの劣化に応じた対処工法を、表-8～表 10 にまとめる。

表-8 構造物の外観上のグレードと対策の選定⁵⁾

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	打替え 取換
状態Ⅰ (潜伏期)	○	(○)				(○)		
状態Ⅱ (進展期)	◎	◎	(○)			(○)		
状態Ⅲ (加速期)	◎	○	◎	○		(○)		
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-9 対策に期待する効果と工法⁵⁾

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

表-10 構造物の外観上のグレードと標準的な工法⁵⁾

構造物の外観上のグレード	標準的な工法
状態Ⅰ （潜伏期）	床版防水
状態Ⅱ （進展期）	床版防水，鋼板・FRP 接着，上面増厚，下面増厚，増設桁
状態Ⅲ （加速期で浸透水の影響有り）	床版防水，鋼板接着，上面増厚，増設桁
状態Ⅲ （加速期で浸透水の影響なし）	床版防水，鋼板接着，上面増厚，下面増厚，増設桁
状態Ⅳ （劣化期）	供用制限，上面増厚，打替え

2.4.3 調査法・工法の選定とシナリオの構築

最適な調査技術・補修技術の選定や要因別対応策シナリオの構築に際しては、図-13 に示す延命化対策選定システムの全体フローを定め、これを洗練，高度化する中で進めていくものである。劣化現象に関しては、部材の劣化と構造の安全性について考え、この相互関係の中で健全性を評価することとする。

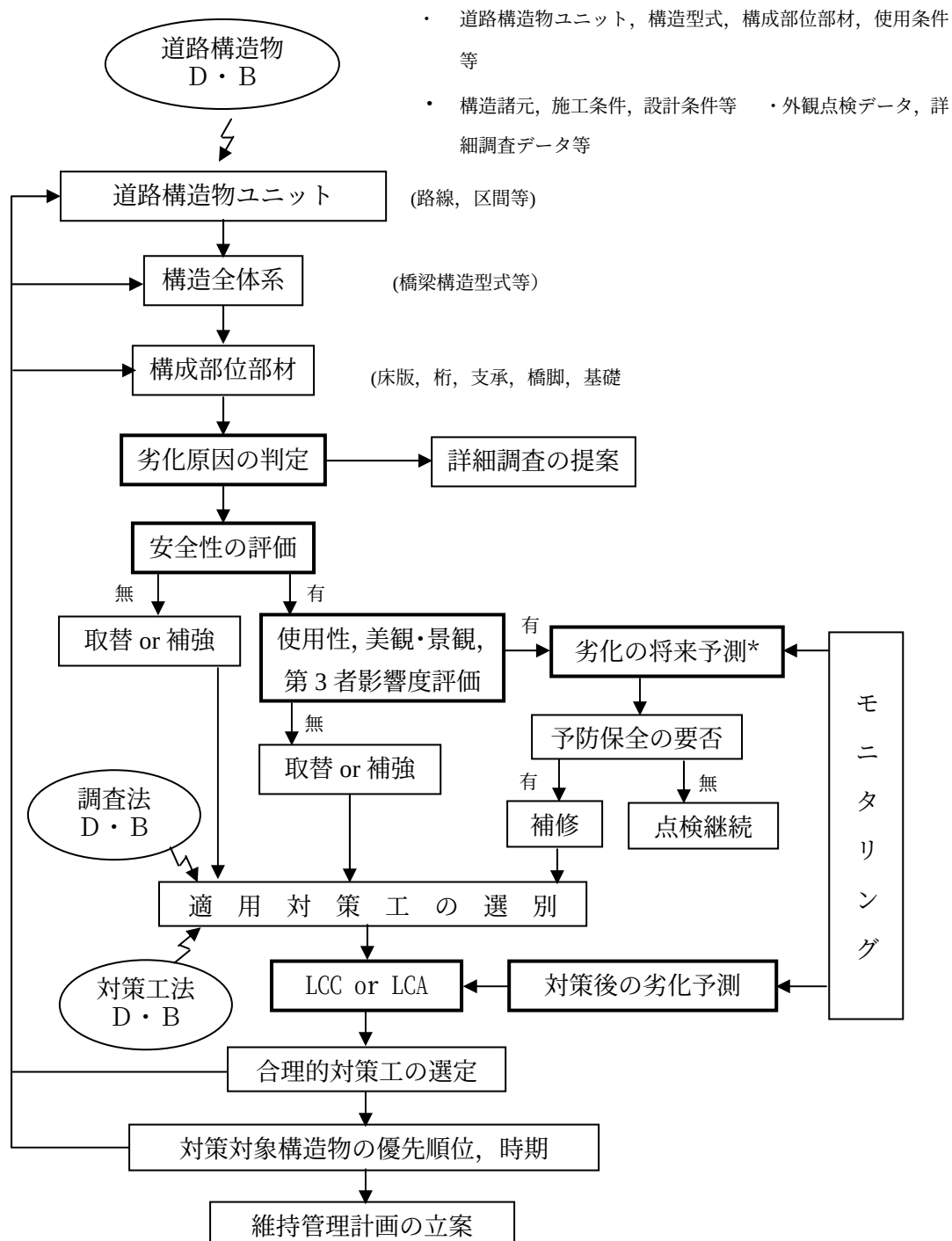


図-13 延命化対策工選定システム将来像

[参考文献]

- 1) 松井繁之：床版の技術開発，橋梁と基礎，vol.31/No.8，84-94，1997.8
- 2) 西川和廣：ライフサイクルコストを最小にするミニマムメンテナンス橋の提案，橋梁と基礎，vol.31/No.8，64-69，1997.8
- 3) コンクリート工学協会：コンクリート診断技術 '02，63-66
- 4) 多田宏行：橋梁技術の変遷，鹿島出版会
- 5) 土木学会：【2001年制定】コンクリート標準示方書〔維持管理編〕162-168
- 6) 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.
- 7) 三木千壽：鋼橋のメンテナンス，橋梁と基礎，Vol.35 8，pp.50-53，2001

3 荷重の実態

3.1 はじめに

前節では、床版の疲労劣化では通過車両による繰り返し载荷により進展すること、さらに鋼部材では車両重量が2倍であれば疲労損傷度が8倍（2の3乗）になること指摘した。供用中の橋梁に作用する荷重の実態を明らかにできれば、より正確な損傷状況を明らかにできるとともに、累積損傷度による劣化予測も可能となる。よって本節では、橋梁応答を用いた車両荷重推定手法についてまとめ、通過車両の頻度と荷重から損傷度を推定する考え方について整理を行う。

また国道に架かる実橋梁を取り上げ、車両の通行状況や履歴を明らかにすると共に、累積損傷度の考え方から橋梁の劣化程度の診断を試みる。

3.2 橋梁を用いた軸重推定

3.2.1 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²⁾。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、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¹⁾。また計量台に2軸が同時に乗らないよう、検知区間が数十センチと短く設定されているため、車両振動が大きい場合正確な計測が行えないという問題点がある。よって現在のところ軸重計は、過積載の警告を与える目的で使用されている。警察の取締りなど高精度で軸重を計測する必要がある場合は、トラックスケールが用いられる。トラックスケールは完全に静止した状態で計測するものであり、交通車両の実態把握など、すべての通行車両の重量を測定する目的では使用できない。また直接軸重を計測する手法として、国道などで走行車両の軸重を測定するシステムも開発されている。

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、着目する部材応答により、主部材のひずみ応答に着目する手法、二次部材のひずみ応答に着目する手法、RC床版のひび割れ幅に着目する手法などに分類することができる¹⁾。またBIWMを原理別に整理すると表-11のようになる。

各種提案されているBWIMであるが、それぞれに長所短所があるため、橋梁の状態に応じ

て手法を選択すればよい。またこのようにBWIMを用いれば、比較的安価に橋梁に作用する荷重の実態を把握することができる。

表-11 軸重推定研究の動向

方式	原理	着目部材	特記事項
I ⁶⁾	主部材の影響線を利用。影響線を多項式近似し、応答値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 ⁷⁾	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 ⁸⁾	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 ⁸⁾	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、多くの測点を要する。
V ¹⁰⁾	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 ¹¹⁾	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。

3.2.2 疲労照査の方法

ひずみ測定を直接行っている部材に関しては、ひずみ履歴をそのまま用いて応力頻度解析を行うことができる。また測定を行っていない部材に関しては、推定された軸重とその時刻歴から、疲労損傷度を推定することが可能である。すなわち、車両振動を無視し、車両進入にのみ応力が変動すると考えれば、各軸により各部材に発生する応力の変動は影響線と軸の大きさで決定する。また部材に発生する応力は、上載荷重の大きさと位置により解析的に求まるため、部材ごとの応力頻度を求めることができる。また同時載荷の影響や動的増幅率についても、設計上設定されている係数を付加することで考慮することが可能である。しかし、この方法もあくまでも解析モデルに依存するため、実際の応力履歴とは異なる可能性もあり、注意が必要である。

3.3 U 橋センサデータから見た荷重特性の推定と疲労に関する考察

3.3.1 U 橋概要

U 橋は、昭和 35 年（1960 年）に建設された 7 径間ゲルバー鋼鈑桁橋であり、現在、床版、および橋桁端部の疲労が問題となっている。また、国道 2 号線は大型車の交通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が高い。橋梁諸元を表-12 に示す。また上部工断面図を図-14 に、橋梁全体の平面図、側面図をそれぞれ図-15、図-16 に示す。

表-12 U 橋概要

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 径間ゲルバー鋼鈑桁橋（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	

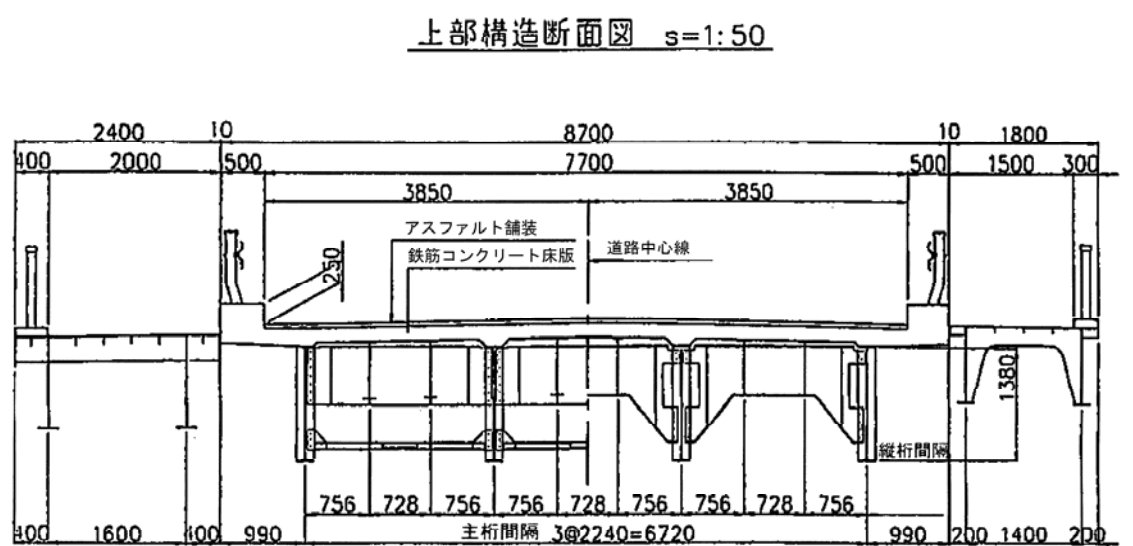


図-14 上部工標準断面図

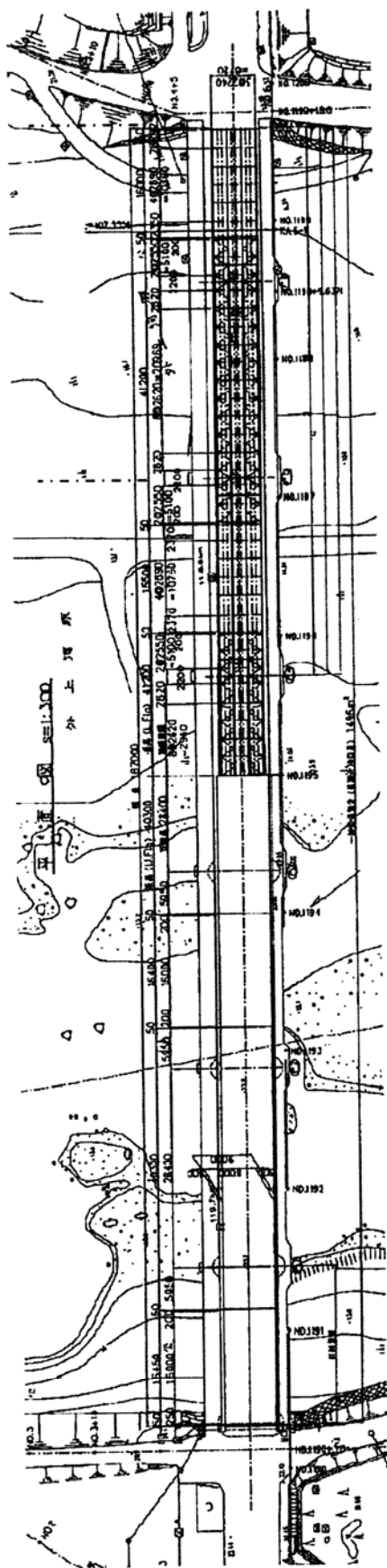


图-15 U 橋平面図

断面図 s=1:300

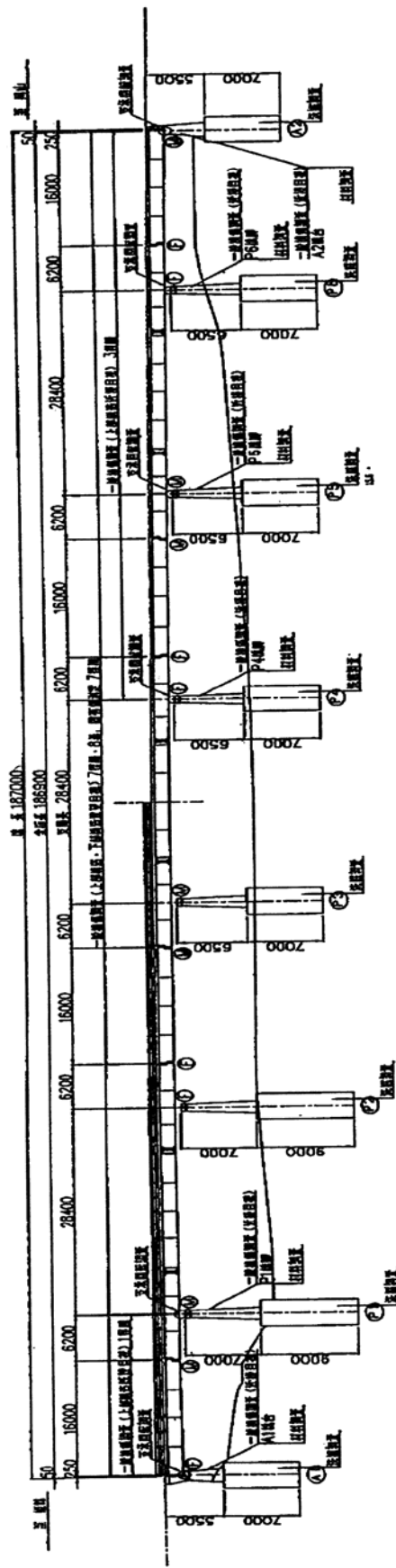


图-16 U 橋側面図

3.3.2 交通センサス結果の整理

U 橋を通過した交通量を把握するため、建設年からの交通センサスデータについて調査を行った。U 橋付近の道路開通状況を図-17 に示す。また、U 橋付近における交通量の調査結果を図-18 にまとめる。

図-18 に示す U 橋付近の交通量データより、周辺道路開通状況と交通量との相関が確認できる。また、U 橋に最も近い B 地点のデータについては、昭和 46 年以前の交通量データが無いものの、A 地点、および C 地点の交通量より十分予測可能であると考えられるため、U 橋の通過交通量については、B 地点のデータを用いるものとした。

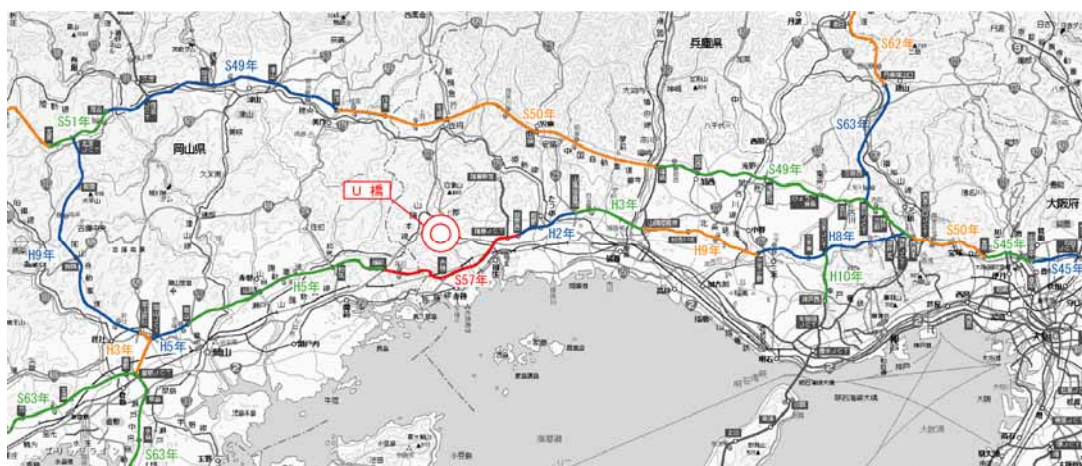


図-17 U橋位置図，および周辺道路開通図

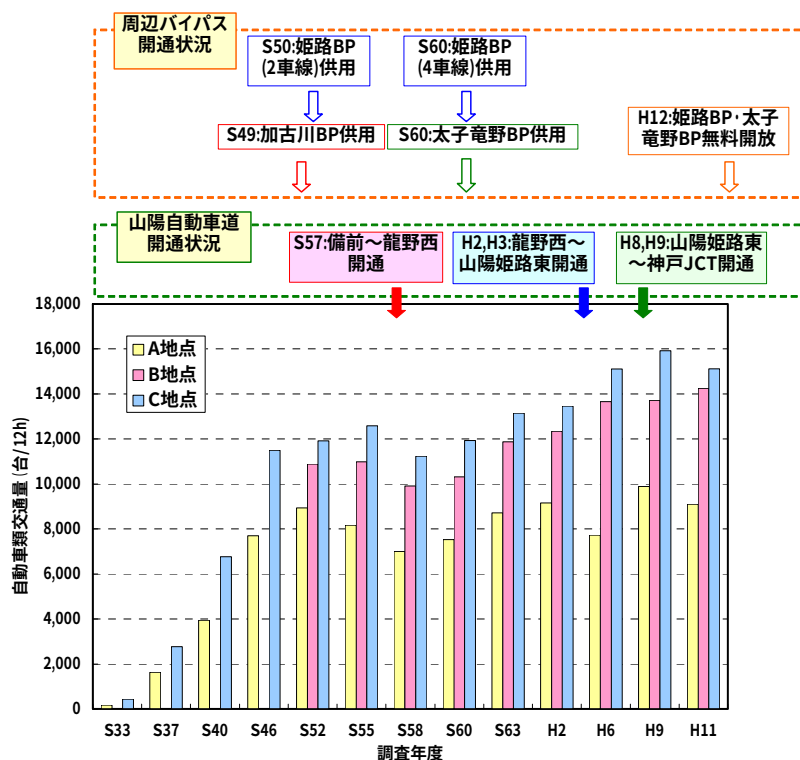


図-18 U 橋付近交通量調査結果

3.3.3 U橋の補強履歴について

U橋は床版の疲労が問題となっており、建設時から現在に至るまで、補修補強が繰り返行われている。U橋での床版補強履歴を表-13に示す。U橋の補修補強履歴を見ると、疲労による損傷が発生していると考えられる床版については、昭和35年の建設当時から、増桁補強（昭和52年）、鋼板接着補強（昭和53年）と、床版増厚（平成15年）の2段階の補強が行われている。よって、床版の疲労損傷について検討する場合には、これらの補強イベントを踏まえた上で整理する必要がある。

表-13 U橋補修・補強履歴

支承	S47:支承補修 S52:沓座拡幅
桁	S52:桁連結 S53:増桁補強
床版	S53:鋼板接着 (620m ²) H15:床版増厚 (t=60mm)
伸縮	S57,S58:伸縮装置補修 H15:伸縮装置取替
その他	H15:排水性舗装(t=40mm) S62:高欄取替 H15:防水性舗装(基層t=35mm) H15:排水装置改良

3.3.4 床版の疲労評価フロー

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、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による通過交通量を行う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-19に示す。

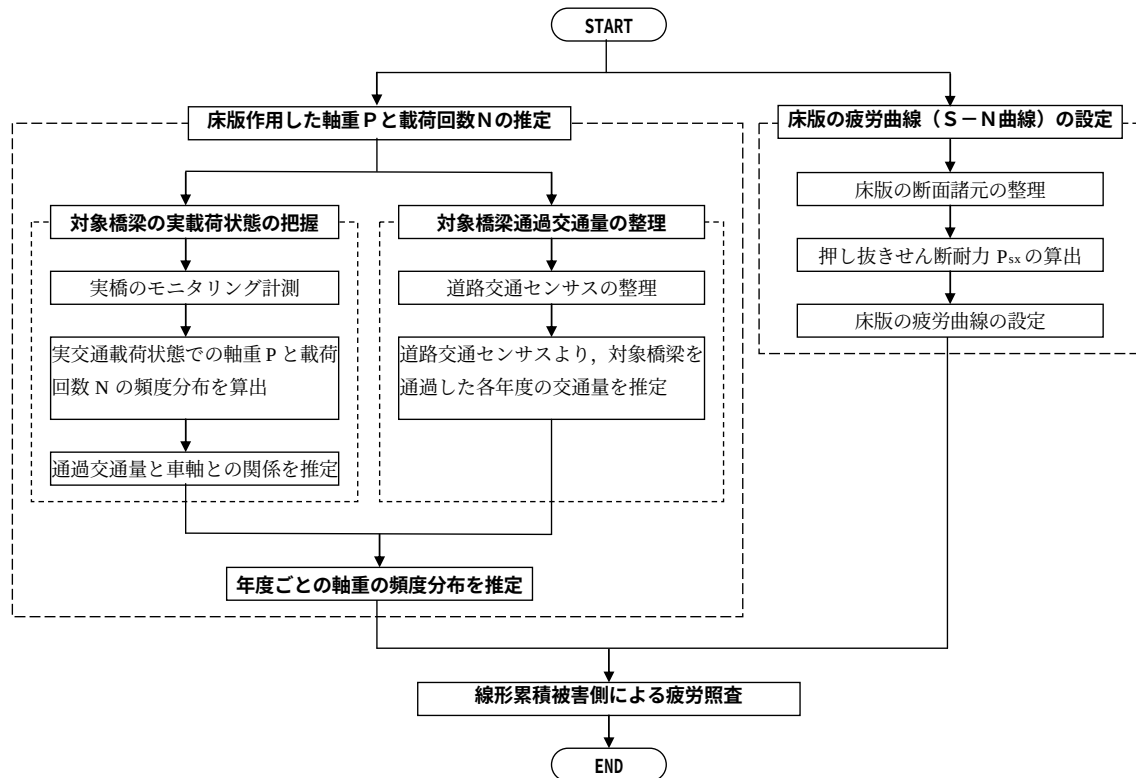


図-19 床版の疲労評価フロー

3.3.5 U 橋における疲労評価

(a) 実測モニタリング結果の整理

U 橋における実測モニタリングより軸重の頻度分布を算出した。軸重の頻度分布を図-19に示す。このデータは、3 時間計測における軸重の頻度分布である。また、計測結果の軸重は通過車両の左右軸重の合計値となっている。

この図より、T 荷重の設計値である 20tf (10tf/軸×2) を超過している車両が通行していることがわかる。床版の疲労照査については、過積載による超過軸重が大きく作用することから、軸重 P と载荷回数 N との関係は実測モニタリングにおける頻度分布をもとにして設定した。また、実測モニタリングにおいては、小型車通行時には、床版に作用する荷重が小さく、軸重として計測結果に現れてこない。よって、図-20 で示されている頻度分布は大型車による軸重が支配的であると考えられる。

自動車の通過による疲労の影響は、大型車通行時によるものが大きく影響を及ぼすと考えられる。そこで、対象とした U 原における交通量データについて、小型車と大型車とに分類し交通量の整理を行った。整理結果を図-21 に示す。

図-20、および図-21 の結果を用いて、U 橋の通過軸重の推定を行った。大型車交通量と通過軸重との関係は、大型車の多くが 3 軸であるということを仮定し、大型車交通量を 3 倍することによって、通過軸重と設定した。

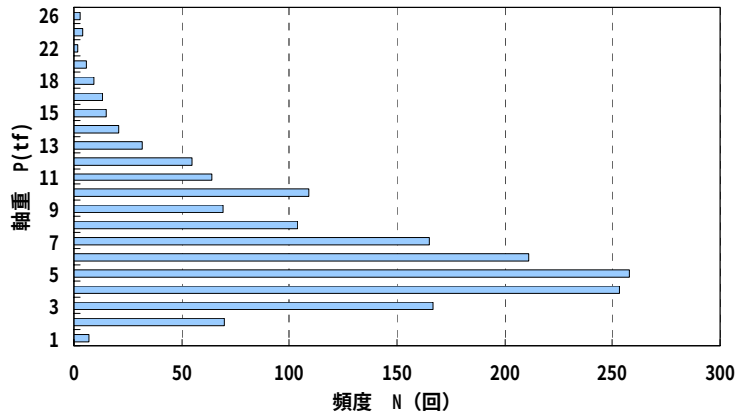


図-20 U橋実測モニタリングによる軸重頻度分布（平日3時間測定）

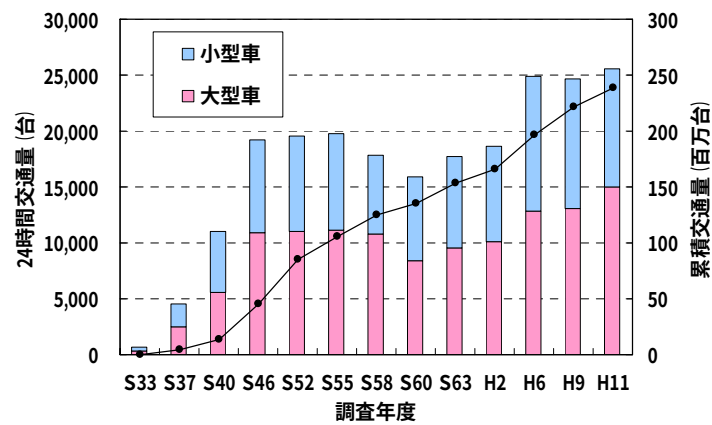


図-21 U橋における通過交通量の推移

(b)床版の疲労曲線，および疲労照査手法

床版の疲労曲線としては，種々の疲労曲線が設定されている．疲労曲線の一例を図-22に示す．この図に示す疲労曲線は，床版の押し抜きせん断耐力 P_{sx} を用いて，載荷荷重を無次元化することにより設定している．

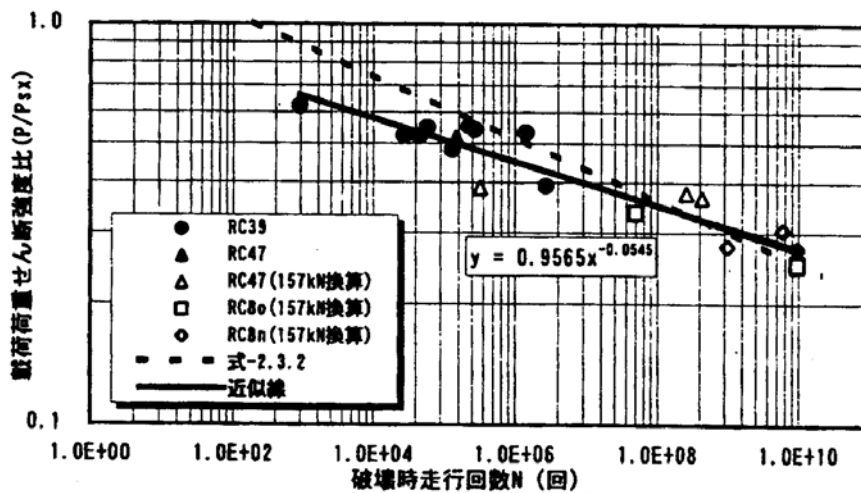


図-22 載荷荷重せん断強度比(P/P_{sx})と破壊時走行回数との関係¹⁾

また、一般に変動応力下における疲労損傷度の評価の考え方としては、線形累積被害則が用いられている。これは部材に作用する応力範囲 $\Delta \sigma_i$ に対して N_i 回で部材に疲労損傷が生じる場合、応力範囲 $\Delta \sigma_i$ の応力範囲 1 回の繰返しによる疲労損傷の程度を $1/N_i$ とし、変動応力下では、その和が疲労損傷条件 D に達した時に疲労損傷が生じると考えるものである（図-23、および式（1））。

$$\sum \frac{n_i}{N_i} = D \quad \text{式（1）}$$

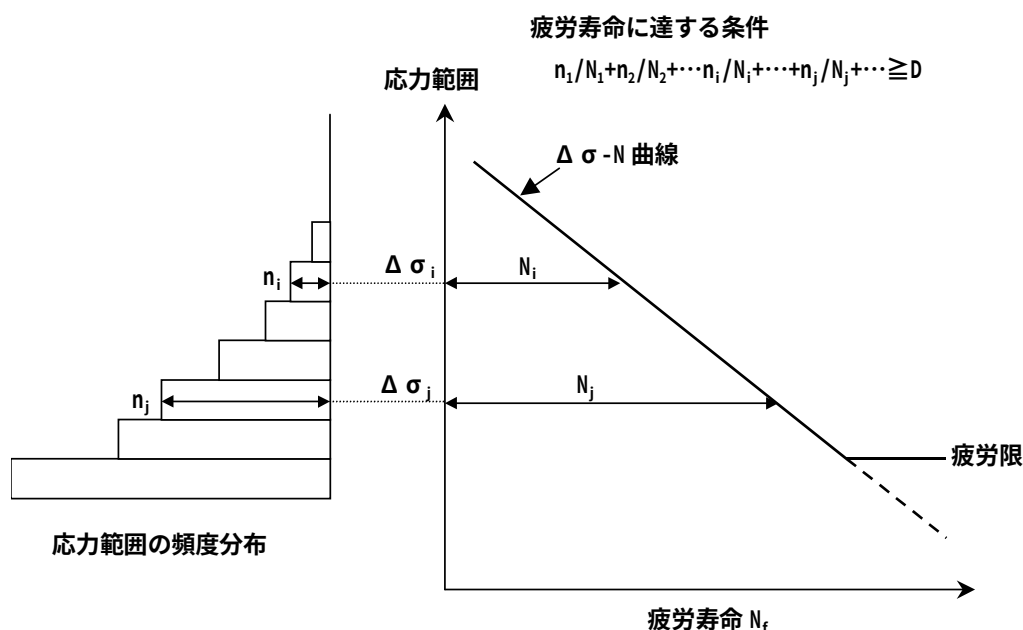


図-23 累積被害則の考え方

(c) U 橋における疲労評価結果

図-24 に示す床版の疲労曲線、および実測モニタリング、および通過交通量より推定した軸重の頻度分布を用いて、床版の疲労照査を行った。疲労照査結果を図-24、および図-25 に示す。

線形累積被害則による床版の疲労照査結果より、U 橋の床版は、昭和 51 年時点において疲労限界に達すると評価される。これらの結果は、第一段階の床版の補強時期である増桁補強（昭和 52 年）、鋼板接着補強（昭和 53 年）と近い値となっている。しかし、疲労評価を行うにあたって、夜間交通量、軸重の頻度分布等の推定値を数多く用いるために、今後実測モニタリングをもとに精度を高める必要がある。

また、疲労照査における閾値が疲労時の終局限界状態であり、床版の補強時期は使用限界状態であることを考えると、使用限界状態の閾値について今後検討する必要があると考えられる。

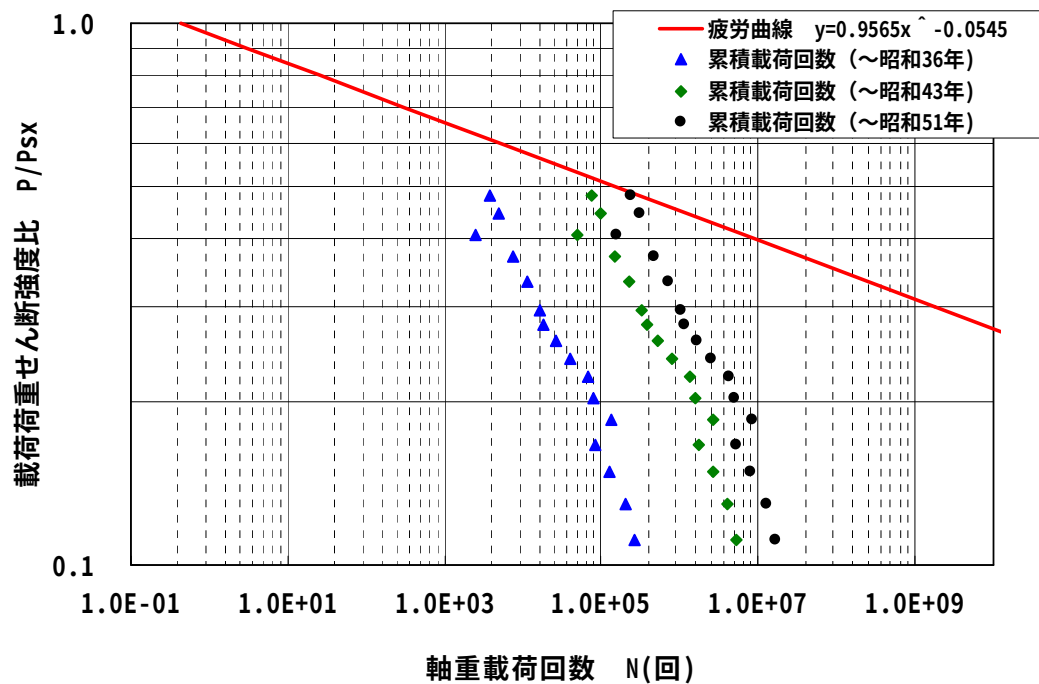


図-24 推定軸重の累積頻度分布と疲労曲線との関係

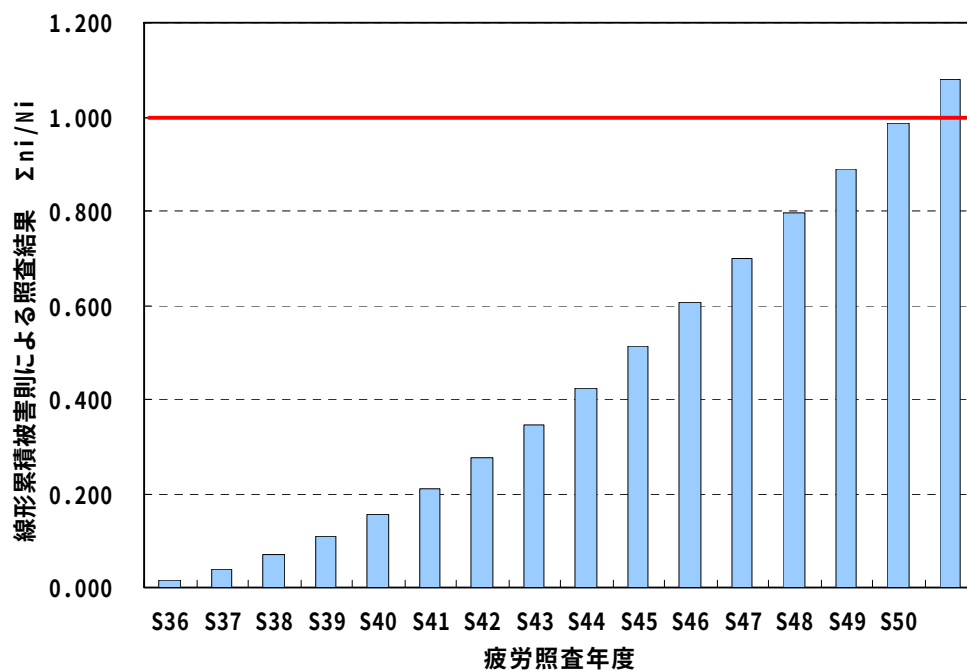


図-25 線形累積被害則による床版の疲労照査結果

3.3.6 まとめ、および今後の課題

U 橋の床版疲労評価についてのまとめ、および今後の課題を次に示す。

- ・今回検討を行った U 橋の床版疲労評価は、今後精度を上げる必要があるものの、既存のデータ、および実測モニタリングを組み合わせることにより疲労評価システムとして構築できることが明らかとなった。
- ・また、床版の疲労に対して影響が大きい交通量、および通過軸重について疲労評価システムに組み込むことによって、床版の疲労に対する指標として有用であることが明らかとなった。
- ・U 橋を対象とした床版疲労評価は、既存の交通量データ、および平日 3 時間のモニタリング結果をもとに通過軸重を推定し行った。今後、夜間交通量や夜間通過重量車の軸重等の計測結果をもとに路線特性や U 橋が置かれている状況がより明確になってくる。
- ・平均軸重数については、今回の疲労評価では 3 軸大型車に着目し、大型車交通量の 3 倍と設定した。文献 4) の表-付 2.6.2 の交通量データによると、大型車の平均軸重数は大型車交通量の 2.61 倍となり、今回の設定軸重数と近い値となっている。
- ・また、3 軸大型車等については、連続して 2 軸が床版を通過するため、実験等による輪荷重載荷状態とは異なる状態となると考えられる。よって、交通量から輪荷重の載荷回数を推定する手法について検討する必要がある。
- ・床版の S-N 曲線の設定は、疲労評価結果に大きく影響を及ぼすと考えため、S-N 曲線の選定について検討を行う必要がある。
- ・疲労評価を行う際に、既存の文献では疲労限界に対する S-N 曲線の定義が多く、今後、使用限界に対する S-N 曲線について検討を行う必要がある。
- ・今後、損傷状況と補修補強等の工事履歴イベントとの突き合わせを行い、安全側と危険側のシミュレーションを行うことを予定している。

3.4 遠隔モニタリングシステム

モニタリング技術に関しては、疲労のみならず広くほかの劣化要因である中性化やアルカリ骨材反応、塩害などについても適用手法やその基礎技術を調査、研究することとしているが、平成 16-17 年度の研究成果と構築した遠隔モニタリング技術・装置を活用して、供用中の実橋梁（当面 U 橋）を対象に、延命化方策の策定手法に関する研究を継続的、発展的に進めるものである。

そのための研究課題は、以下のとおりである。

- 1) 遠隔モニタリング技術を活用して活荷重特性等の評価を行う。
- 2) 最適な調査技術の選定や補修技術の検証などに活用・連動する仕組みの提案を行う。
- 3) 既設橋のインフラセキュリティシステムの提案を行う。

既設橋のインフラセキュリティシステムの基本フレームを図-26 に示す。

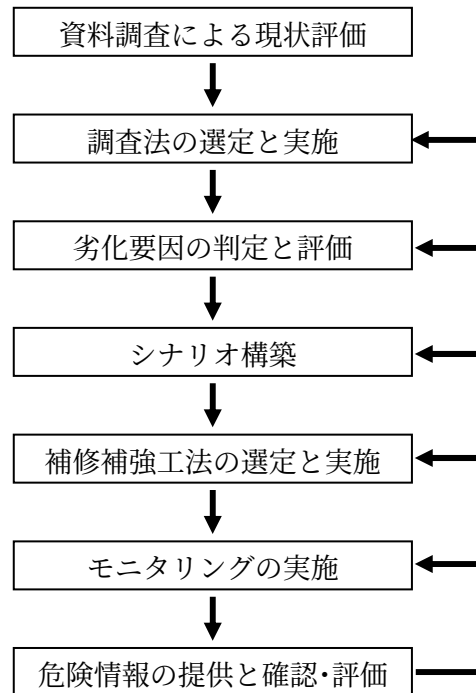


図-26 インフラセキュリティシステムの基本フレーム図

[参考文献]

- 1) 土木学会鋼構造委員会鋼橋床版の調査研究小委員会：道路橋床版の新技术と性能照査型設計，平成 12 年 10 月
- 2) 内田賢一，西川和廣：既設道路橋床版の疲労耐久性に関する検討，第一回鋼橋床版シンポジウム講演論文集，pp.37-42，1998 年 11 月
- 3) 阪神高速道路公団，阪神高速道路管理技術センター：道路橋 RC 床版のひびわれ損傷と耐久性，平成 3 年 12 月
- 4) 日本道路協会：鋼道路橋の疲労設計指針，平成 14 年 3 月
- 5) 小川篤生編：現場技術者のための道路橋維持管理の実際（コンクリート橋編），山海堂
- 6) 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.
- 7) 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.
- 8) 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.
- 9) 小塩達也，山田健太郎，若尾政克，因田智博：支点反力による BWIM を用いた自動車軸重調査と荷重特性の分析，構造工学論文集，Vol.49 A，743-753，2003.
- 10) 小塩達也，森田俊樹，深田宰史，山田健太郎，梶川康男：自動車荷重と橋梁・地盤振動の同期モニタリング，構造工学論文集，Vol.50 A，395-402，2004.
- 11) 米田昌弘，枝元勝哉：GA を適用した橋梁交通量の推定法に関する研究，構造工学論文集，Vol.49 A，755-765，2003.

2 編 モニタリング技術

1	概要	2-1
1.1	はじめに	2-1
1.2	モニタリングの目的と位置付け	2-2
1.2.1	目的	2-2
1.2.2	位置付け	2-2
1.3	遠隔常時モニタリングの目的と意義	2-2
2	調査・計測方法	2-4
2.1	調査・計測の概要	2-4
2.2	調査・計測フロー	2-4
3	遠隔モニタリングシステム	2-7
3.1	システム構成	2-7
3.2	遠隔監視システム	2-7
3.3	画像監視システム	2-8
3.4	課題	2-9
4	実橋におけるモニタリング事例	2-10
4.1	U 橋の概要	2-10
4.2	モニタリング計画	2-11
4.3	測定技術	2-12
4.3.1	ひずみ計測，加速度計測	2-12
4.3.2	変位計測	2-13
4.4	モニタリングシステム	2-14
4.5	管理計画	2-15

1 概要

1.1 はじめに

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る、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（例えば、変位計測、ひずみ計測等）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。

「道路構造物の今後の管理・更新等のあり方に関する検討委員会（委員長 岡村 高知工科大学学長）においても、今後必要となる技術として

- 1) 精度で効率的な点検技術・記録技術
- 2) 赤外線、超音波、光ケーブルなどを活用した構造物内部の点検技術
- 3) レーザー光線、ハイビジョンカメラ等による構造物の表面状態の定量的な記録技術
- 4) 発生応力等を把握するための非破壊手法による点検技術
- 5) 現地に到達することが困難な箇所の遠隔点検、モニタリング技術
- 6) 点検結果の記録技術・活用技術の高度化

などがあげられ、その必要性が述べられている。

特に、モニタリングシステムについては、少子高齢化を迎える日本においては重要な技術であり、また、その導入により、高精度・高頻度での観察が可能になる。

この結果、**図-1**に示すように、橋梁の危険個所の早期発見・早期対応が可能になり、さらに、将来的には危険予測による通行規制が可能になると期待されている。なお、モニタリングは特定の位置など予め定められた情報のみの収集であるため、総合判断を行うためには、目視点検等による状況観察が不可欠である。

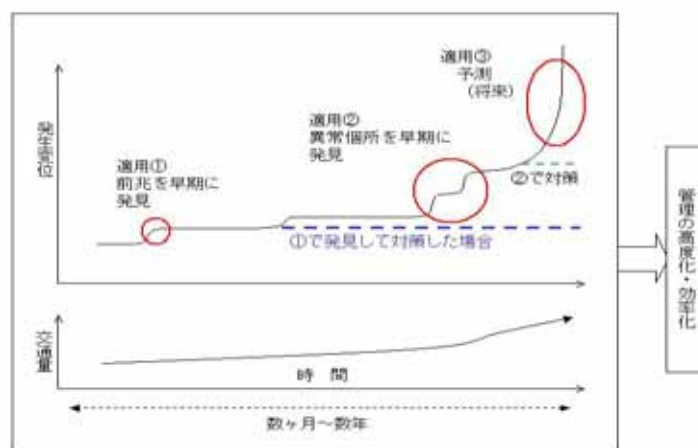


図-1 モニタリングシステムの導入効果

1.2 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。

1.2.1 目的

橋梁構造物に発生する異常予知・予測を目指し、異常個所の抽出（位置の特定）と、橋梁危険個所の監視（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、対策済みの個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。

1.2.2 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。

ここで、“管理の高度化”とは、以下のような内容を指している。

- 1) 客観的数値データを得ることにより、目視観察よりも高精度に変状の進行等を判断する。
- 2) 常時、計測することにより、対応の迅速化を図る。
- 3) 計測値による管理基準値を設けることにより、より効果的な橋梁マネジメントを行い、サービスレベルの向上を図る。

また、“管理の効率化”とは、以下のような内容を表している。

- 1) オンライン計測でリアルタイムに現地状況を把握することにより、きめ細かい現地状況の把握を行う。
- 2) 異常個所を特定することにより、重点的な点検を実施する。
- 3) カルテ等の点検における計測を計器で行うことにより点検者の負担を軽減し、その分、点検者は目視観察事項を入念に観察できるようになる。

1.3 遠隔常時モニタリングの目的と意義

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．

2 調査・計測方法

2.1 調査・計測方法の概要

また、前述したように最新の調査・計測技術は目覚ましい発展を遂げており、従来の技術を含めたそれらを体系付けて理解する必要がある。そこで、本プロジェクトでは現時点で考えられる調査・計測技術をリサーチし、その結果を調査・計測フローとしてまとめた。

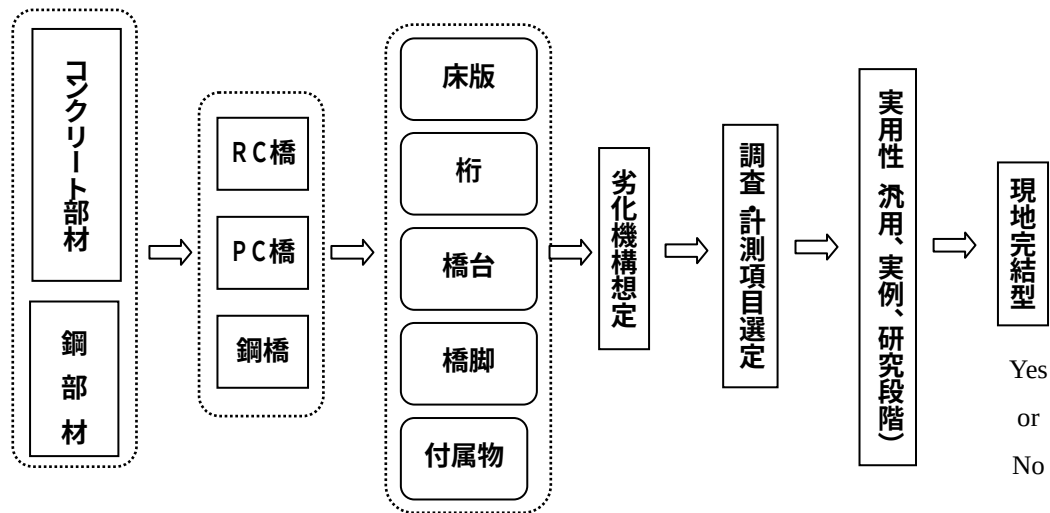
2.2 調査・計測フロー

既存橋梁の調査・計測フローの一例を図-2 に示す。本フローでは対象を大きくコンクリート部材と鋼部材に分け、それぞれ橋種は RC 橋、PC 橋、鋼橋、部位・部材は、床版、桁、橋台、橋脚、杓、付属物とした。また、劣化機構は、一般的な中性化、塩害、凍害、化学的侵食、アルカリ骨材反応、鉄筋コンクリートはりの疲労、鉄筋コンクリート床版の疲労に加え、PC グラウトの充填不足、PC の残存応力などを対象とした。

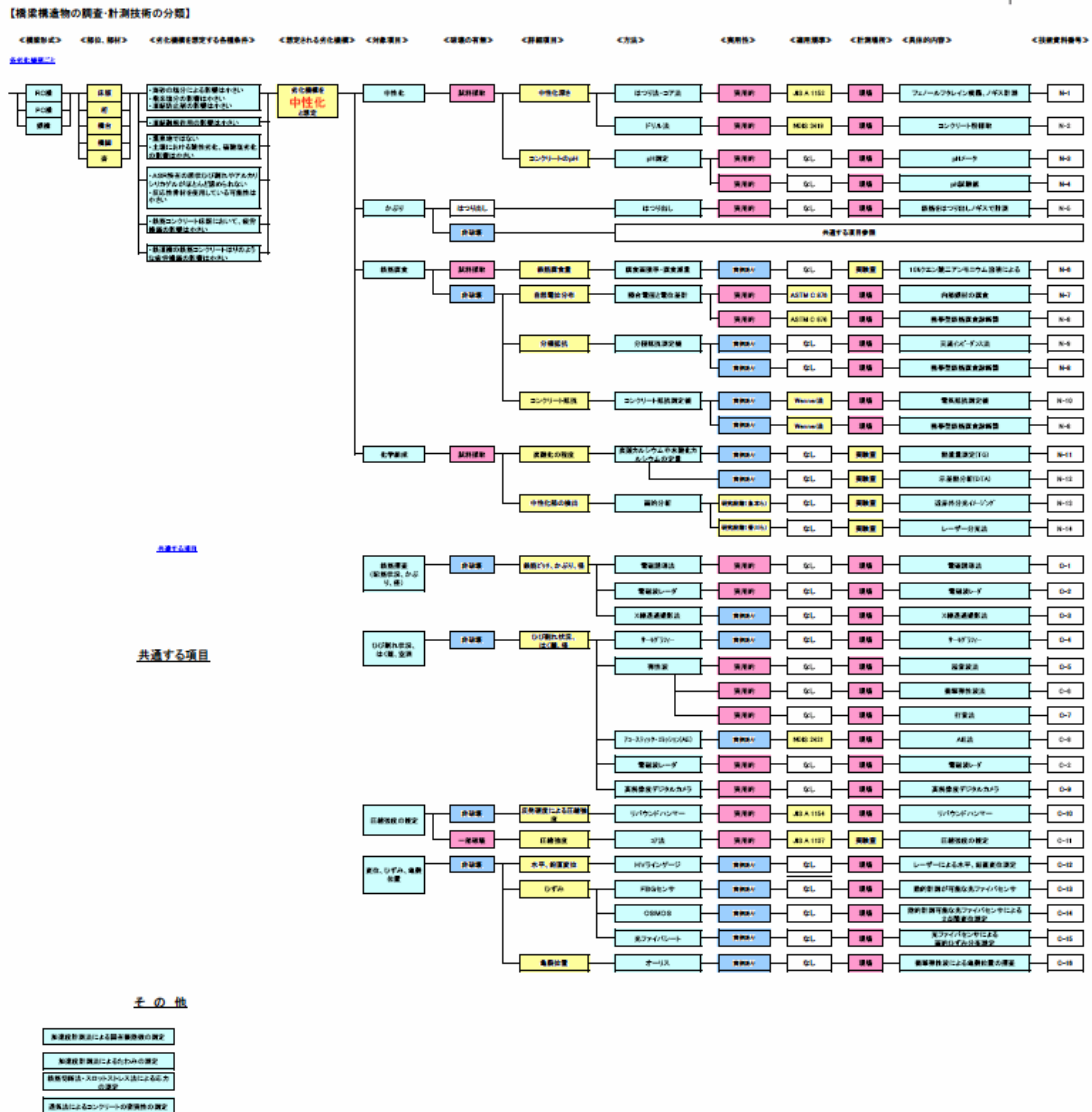
この調査・計測フローでは、各種の条件により劣化機構をある程度特定した後に、その劣化機構に対応する項目を選定し、試料採取を行うかなどの破壊の有無、豊富な実例を有しているのか研究段階かなどの実用性、JIS などの適用規準の有無、調査・計測が現地で完結するのか実験室内でないと行えないものかななどを条件とすることにより、適切な方法を選定できるように配慮してある。また、本プロジェクトで検討を加えた新技術である「高解像度デジタルカメラ」「HV ラインゲージ」「FBG センサ」「OSMOS」「光ファイバシート」「オーリス」を加えてある。

さらに、このフローにより最終的に選定された調査・計測技術に対応した技術資料番号が示され、そこから「橋梁構造物延命化技術 調査表」が導き出され、より具体的な内容を知ることができる。

本報告書では、その一例として、劣化機構を中性化と想定した場合の調査・計測フロー、共通する項目である鉄筋探査、ひび割れ状況、はく離、空洞、変位、ひずみなどを対象とした調査・計測フロー、さらに「橋梁構造物延命化技術 調査表」の一例として「OSMOS」を示してある（図-3）。



(1) 全体の流れ



(2) 中性化による劣化を対象としたフローの例

図-2 調査・計測技術フロー

橋梁構造物延命化技術 調査表										
技術名称		光ファイバセンサーを用いた計測システム								
副題		OSMOSセンサー								
開発会社名	問合せ先	会社名	(株)宮地鐵工所			(株)間組				
		TEL	0436-43-8524			029-858-8813				
		E-Mail	noto-h@miyaj-iron.com			hasui@hazama.co.jp				
		URL	http://www.miyaji-iron.com/			http://www.hazama.co.jp/newtech/				
開発体制	☐ 単独 ☐ 共同研究 (☐ 民民 ☐ 民官 ☐ 民学 ☐ 民官学)									
	共同研究名	OSMOS技術協会(事務局:日本エヌ・ユー・エス(株))								
技術適用項目	適用橋梁構造形式	RC・PC	☒ RC・PC造 ☐ PC鋼材関連(グラウト含む)							
		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)							
		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							
		スチール	☒ 鋼材腐食(塗装劣化) ☒ 鋼材の亀裂 ☐ 全体系(例)全体系の歪み、異常振動、異常等							
		共通	☐ その他 (RC構造物の内部構造)							
NETIS登録		☒ 有り	☐ 無し	登録年月日	2000.09.28		登録番号	KT-000059		
特許・実用新案	特許	☒ 有り	☐ 出願中	☐ 出願予定	☐ 無し	登録番号	第2509255			
	実用新案	☒ 有り	☐ 出願中	☐ 出願予定	☐ 無し	登録番号				
評価・証明	建設技術評価	証明機関				番号				
		証明年月日				番号				
	民間開発建設技術	証明機関				番号				
		証明年月日				番号				
	その他の制度等による証明	制度の名称				番号				
証明年月日				番号						
証明機関				番号						
証明範囲				番号						

1.概要	光ファイバーのマイクロベンディングの原理を利用し、光ファイバーをセンサーとして用いている。対象部材の2点間の相対変位を静的・動的に計測し、その計測値をひずみ・応力に変換して構造物の挙動をモニタリングする技術です。直接比較できる従来の技術はありませんが、測定原理的にはひずみゲージと、機能的には特許化に近いと考えられます。一般的なセンサー長は1、2、5、10mが用意されており、このセンサーを走るものがないスペースがあれば、鋼・コンクリートに関係なくどこでも適用可能です。
2.特徴	従来のひずみゲージと同等な測定精度を維持しながら、構造物のマクロ挙動(0.15~1.0m間の平均ひずみ)の計測が可能です。電気ノイズの影響を受けないこと、また永久的に留まっているため設置回数に限らず、長期でも高精度で安定した計測ができます。また、モニタリングの中断、再開は自由に行えスリーピングセンサーとして活用可能です。
3.施工方法	1) センサーを固定する定着板(治具)をビスまたは接着剤で対象部材に取り付けます。対象部材が鋼材で接着剤を使用する場合、鋼材が腐食しないように十分な塗布を事前に設置できます。 2) センサーを定着板に固定します。 3) オプティックス(光)電気変換器、現場パソコンを設置・配線して完了です。
<評価手順> 1) 動的・静的20Hz、静的(30分間の平均)に計測します。 2) 計測した相対変位を"ひずみ","応力"に変換します。 3) 評価方法例 ○健全度評価(鋼材、コンクリート材)	

4.適用条件	適用条件は、センサー雰囲気温度が-20℃~60℃であり通常の使用は十分カバーしています。適用上の制約条件は、ほとんどありません。水中・海中を始め厳しい環境にも耐えられます。また電気的ノイズ、電磁波の影響を受けないため、電波塔や高圧送電線の近傍の施設も設置可能です。
5.施工・使用上の留意点	
6.その他	

橋梁構造物延命化技術 調査表 (追加表)									
技術名称		光ファイバセンサーを用いた計測システム							
副題		OSMOSセンサー							
開発会社名	問合せ先	会社名	(株)宮地鐵工所			(株)間組			
		TEL	0436-43-8524			029-858-8813			
		E-Mail	noto-h@miyaj-iron.com			hasui@hazama.co.jp			
特許・実用新案	特許	☒ 有り	☐ 出願中	☐ 出願予定	☐ 無し	登録番号			
		☒ 有り	☐ 出願中	☐ 出願予定	☐ 無し	登録番号			
		☒ 有り	☐ 出願中	☐ 出願予定	☐ 無し	登録番号			
		☒ 有り	☐ 出願中	☐ 出願予定	☐ 無し	登録番号			
評価・証明	建設技術評価	証明機関				番号			
		証明年月日				番号			
		証明年月日				番号			
		証明年月日				番号			
	民間開発建設技術	証明機関				番号			
		証明年月日				番号			
		証明年月日				番号			
		証明年月日				番号			
	その他の制度等による証明	制度の名称				番号			
		証明年月日				番号			
証明機関					番号				
証明年月日					番号				
証明機関					番号				
証明年月日					番号				
技術適用項目	適用橋梁構造形式	鋼橋(鋼床版、RC床版、PC床版含む)、コンクリート橋(RC、PC)							
	適用劣化要因	腐食、割れ、疲労き裂、コンクリート部材の劣化							

図-3 調査表の一例(OSMOS)

3 遠隔モニタリングシステム

3.1 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。

3.2 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方法である。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ので、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-4 には、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。

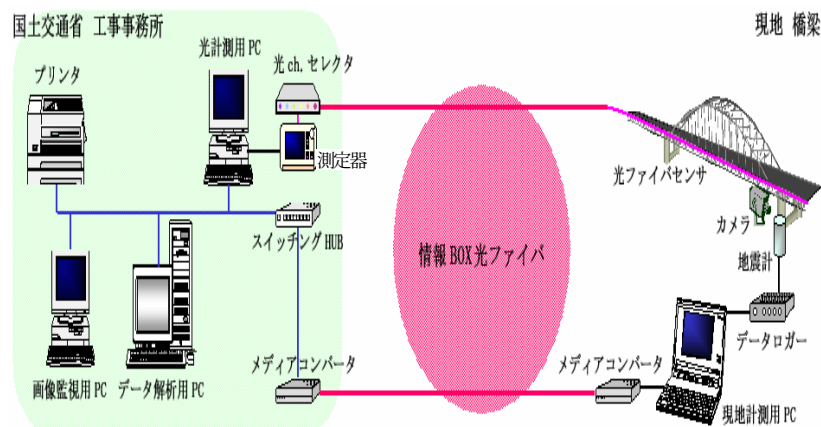


図-4 通信システムの基本構成例

3.3 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。図-5には、監視カメラシステムの概要を示す。

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ため、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。

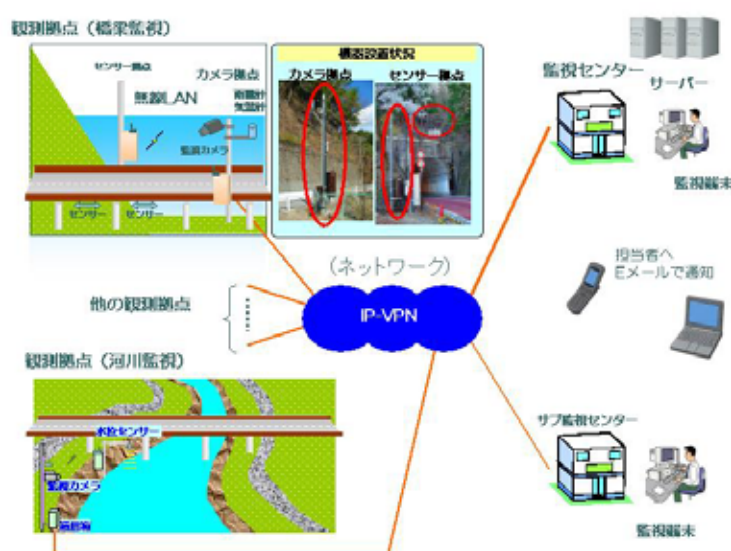


図-5 監視カメラシステム（例）

3.4 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 of 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。

4 実橋におけるモニタリング事例

4.1 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。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-1 に、外観を図-6 に示す。

表-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-6 U 橋の外観

4.2 モニタリング計画

U 橋におけるモニタリング計画を図-7 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-7、図-8 に示す。

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。

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 ～
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-7 U 橋におけるモニタリング計画

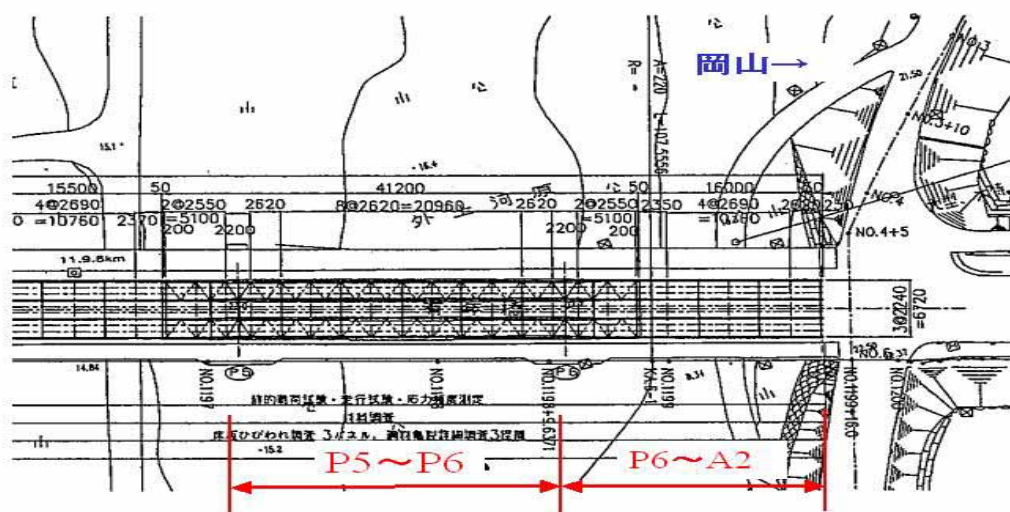


図-8 U 橋の計測区間（平面図）

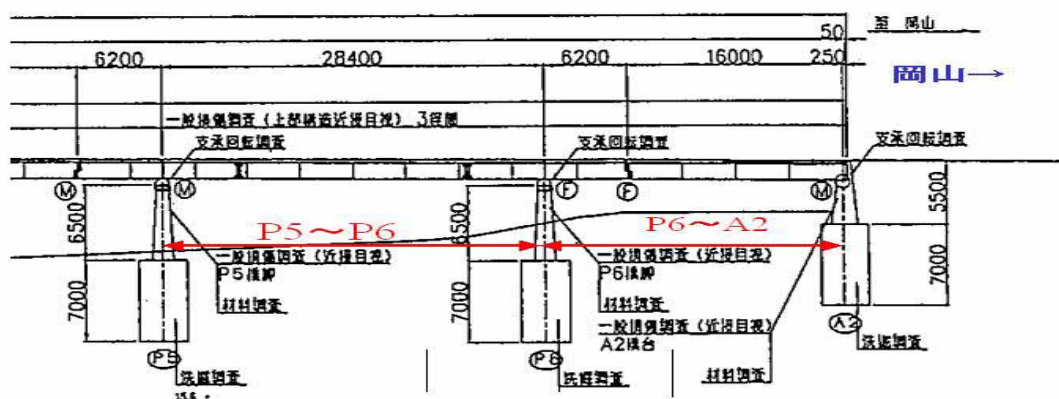


図-9 U橋の計測区間（側面図）

4.3 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。

4.3.1 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-2に示す。

表-2 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。

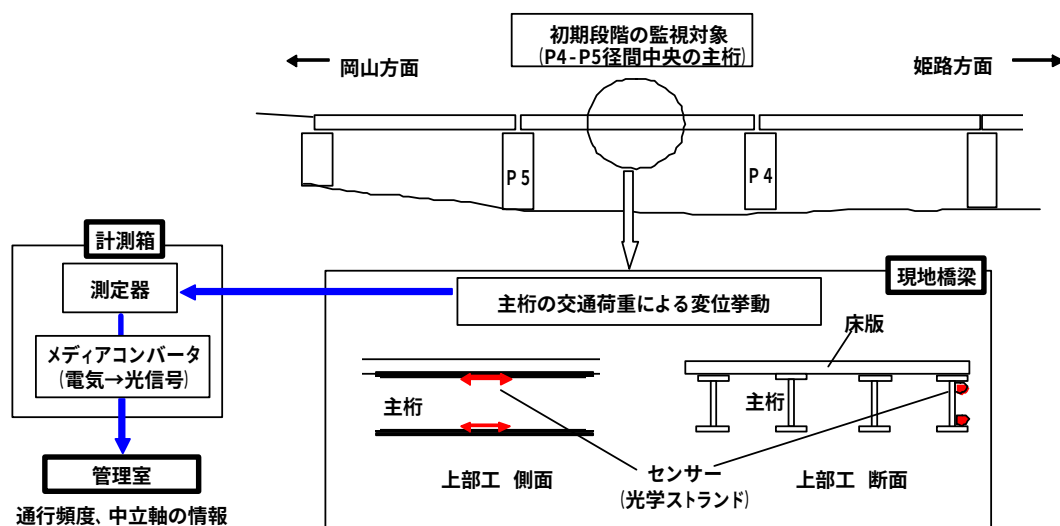
4) 床版の振動

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。

4.3.2 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-10)。



(a) モニタリングの概要

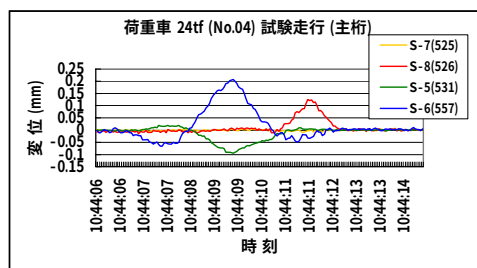
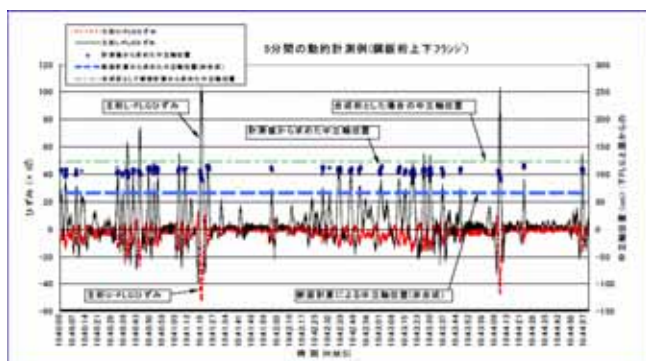


図-1-1 24tf(主桁)

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-10 OSMOS による有年橋モニタリングの概要

4.4 モニタリングシステム

1) 現地計測

現地計測における計測システムを図-11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。

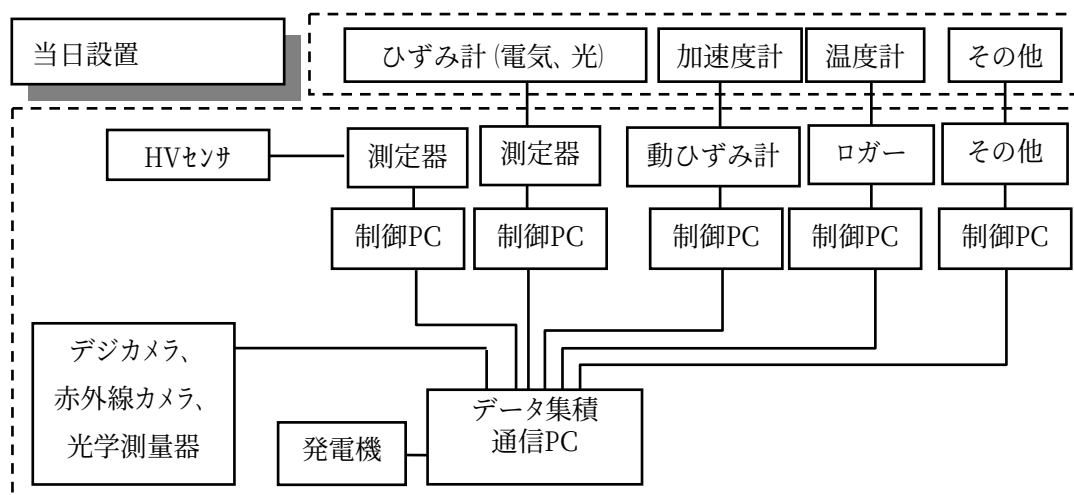


図-11 現地計測システム

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-12に、概要を図-13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。光ファイバセンサのFBG方式については、測定器を管理事務所へ設置し、遠隔測定を行う予定である。また測定したデータについては、大学や研究所などにも配信できるシステムとする計画である。

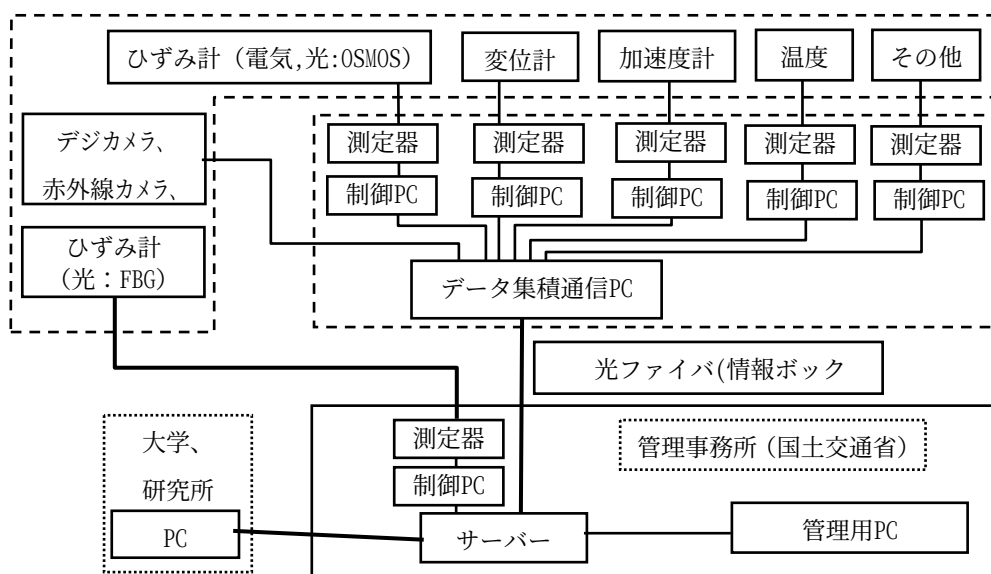


図-12 遠隔モニタリングシステム

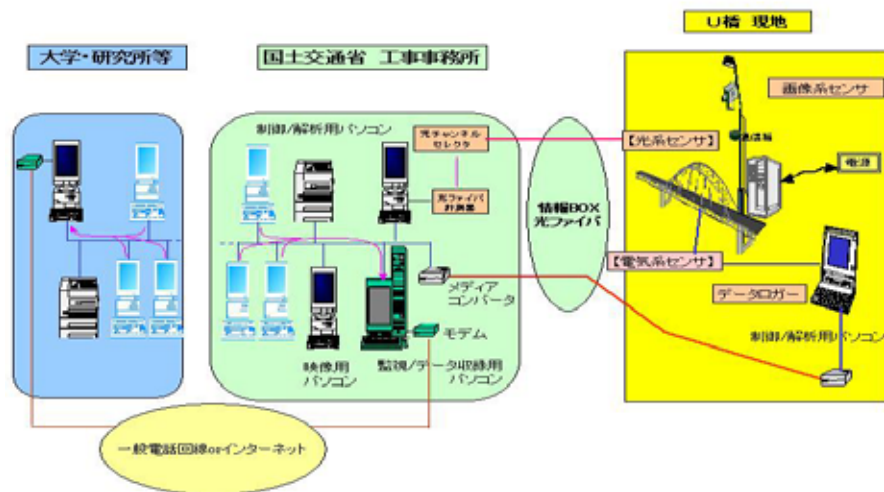


図-13 遠隔モニタリング概要

3) 光ファイバ通信による遠隔地での測定

図-14 に、光ファイバ通信を利用したシステムの詳細を示す。

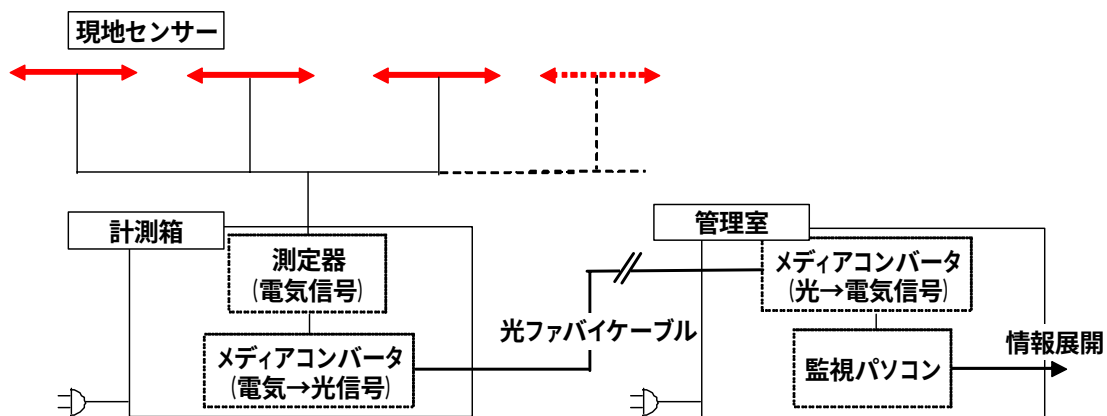


図-14 光ファイバ通信の詳細

4.4 管理計画

1) 常時モニタリング

軸重推定により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。またフランジや隅角部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。

2) 定期的モニタリング

1週間あるいは1ヶ月に1回程度の頻度で、上下フランジの測定値により主桁の中立軸位置を確認し、橋梁の力学的挙動に変化がないことを確認する。

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	3-3
2.2	プレストレストコンクリート構造物の劣化機構	3-4
2.2.1	劣化要因の種別	3-4
2.2.2	劣化過程と対応策	3-4
2.3	鋼構造物の劣化機構	3-5
2.3.1	劣化要因の種別	3-5
2.3.2	劣化過程と対応策	3-6
3	対応策と具体的対策工	3-8
3.1	鉄筋コンクリート構造物への対応策	3-8
3.1.1	対応策の要求性能と評価方法	3-8
3.1.2	要求性能に応じた対策工と具体的工法	3-9
3.2	プレストレストコンクリート構造物への対応策	3-10
3.2.1	対応策の要求性能と評価方法	3-10
3.2.2	要求性能に応じた対策工と具体的工法	3-11
3.3	鋼構造物への対応策	3-11
3.3.1	対応策の要求性能と評価方法	3-11
3.3.2	要求性能に応じた対策工と具体的工法	3-12
4	延命化対策工選定システム	3-14

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る、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、鉄表面が不動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、鉄筋表面の不動態が破壊され、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。

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。

構造物の性能を定量的に評価し把握することは大切であるので、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-1に示す。

表-1 構造物の外観上のグレードと対策(塩害)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-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

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 PC鋼材関連の劣化要因と種別

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 사용되는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 PC鋼材関連の劣化過程と対応策

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-1 桁端部における腐食²⁾



写真-2 現場継手部の腐食²⁾

(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 支承ソールプレート溶接部付近の亀裂²⁾



写真-4 縦リブ現場溶接部の亀裂²⁾

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，通常の日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，表-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-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	フェースプ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 鋼材の疲労による劣化期間の定義³⁾

劣化過程	定 義	期間決定の主要因
潜伏期	疲労損傷が設計限界(疲労確率2.3%)に達するまで	疲労累積損傷度 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	疲労設計限界値 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-4 付属物の亀裂による劣化程度³⁾

	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	フェースプレートに変形、溶接部に割れ、
加速期	鉛直荷重支持部材にひび割れ	フェースプ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、ローラーやベアリングプレートが逸脱、	フェースプレートのフィンガーが破断、シール材が噴出

【参考文献】

- 1) (社) 土木学会；「2001年制定 コンクリート標準示方書(維持管理編)」
- 2) (社) 日本橋梁建設協会；「鋼橋の損傷と点検・診断」，2000年5月
- 3) (社) 日本鋼構造協会；「土木鋼構造物の点検・診断・対策技術」，2005年11月

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-5、表-6 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-5 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 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-6 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	F R P 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-7 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-5、表-6 を参照することができる。

(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。

表-7 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
又鋼材関連の劣化	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	

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鍍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．

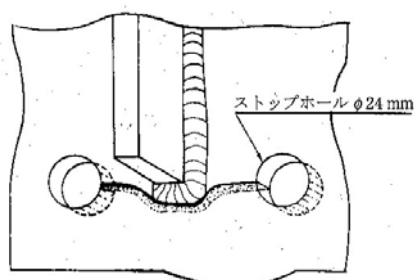


図-1 ストップホール¹⁾



写真-5 当て板¹⁾

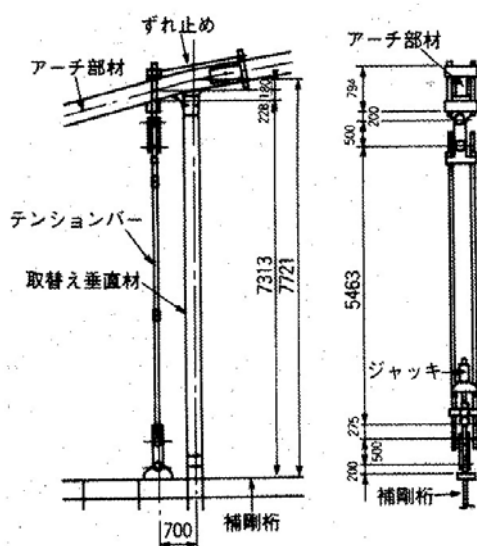


図-2 部材取替え（アーチ吊材）¹⁾

【参考文献】

1) (社)日本鋼構造協会；「土木鋼構造物の点検・診断・対策技術」，2005年11月

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（鋼橋）の構造形式の橋梁を対象としている。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-8のとおりである。図-3、図-4、図-5 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。

表-8 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					

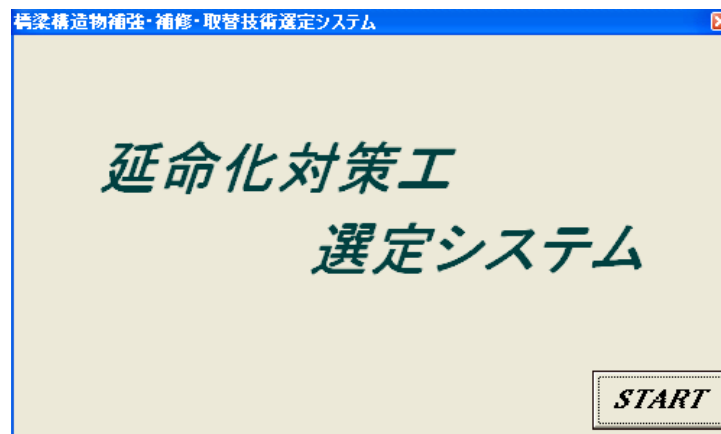


図-3 システム起動画面

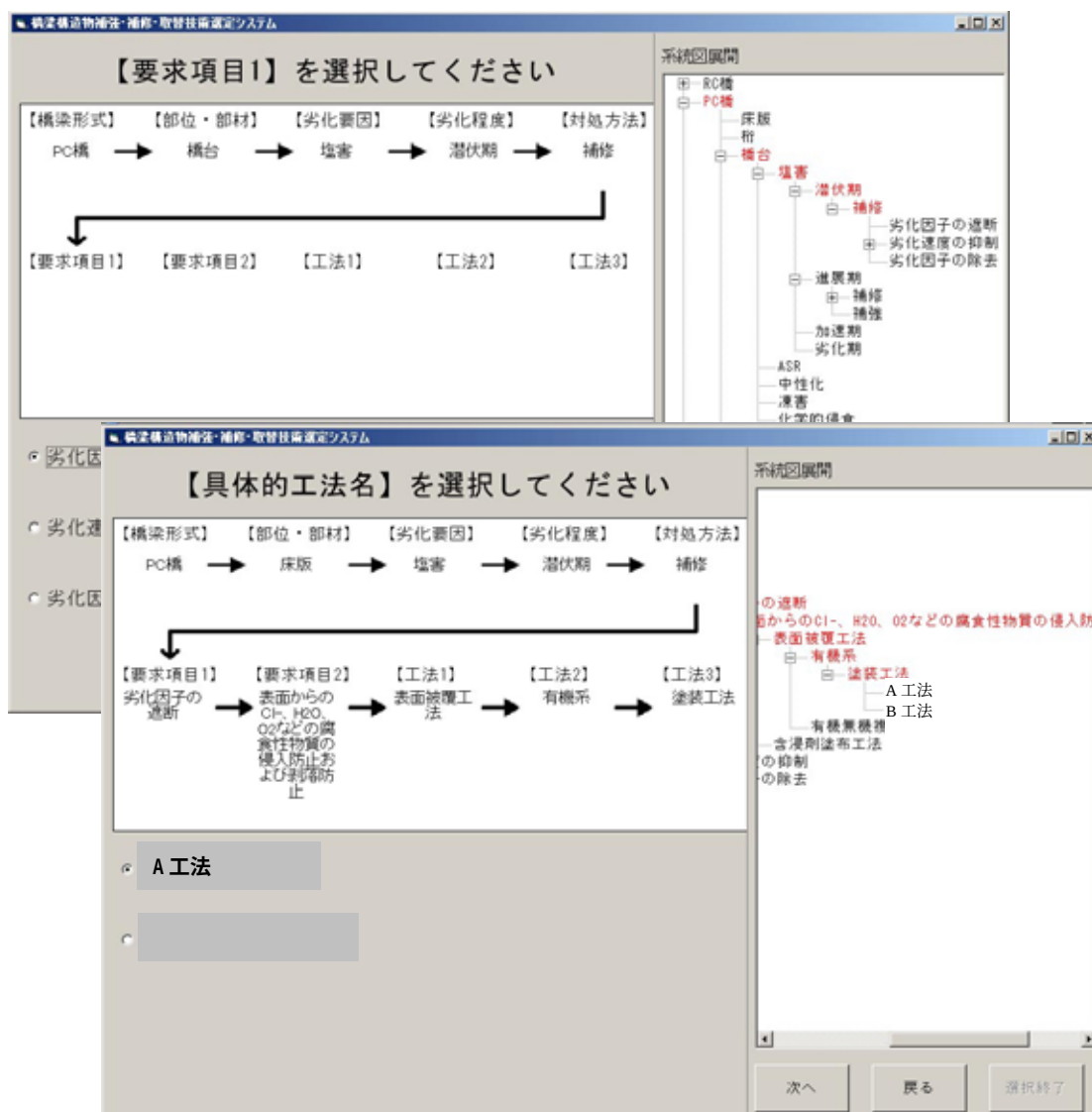
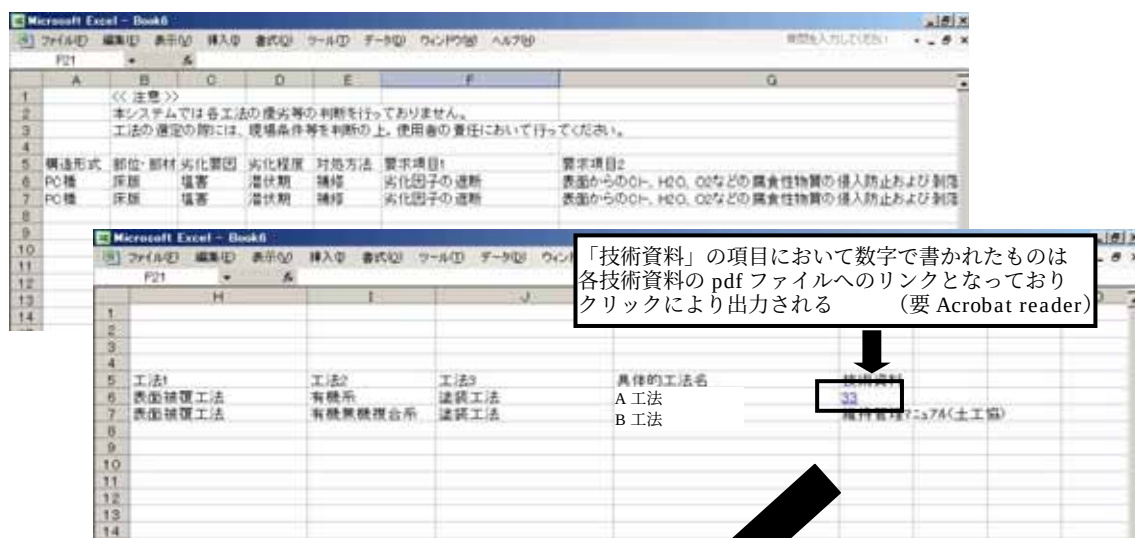


図-4 メイン画面の表示例



橋梁構造物延命化技術 調査表

技術名称	〇〇工法					
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					
	部署名	土木本部延命課		担当者名	延命太郎	
	TEL	12-3456-7890	内線	000	FAX	12-3456-7899
	E-Mail	enmei@aaa.co.jp				
	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		〇〇工法協会			
	共同研究メンバー		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 (グラウト含む)			
		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)			
		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			
		スチール	☐ 鋼材腐食 (塗装劣化) ☐ 鋼材の亀裂 ☐ 全体系 (例: 全体系の变形、以上振動、異音等)			
		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-5 選定結果の表示例

