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)]．

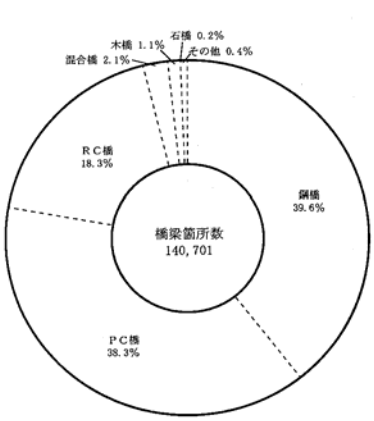


図 1-2.1　橋種別橋梁箇所数比率

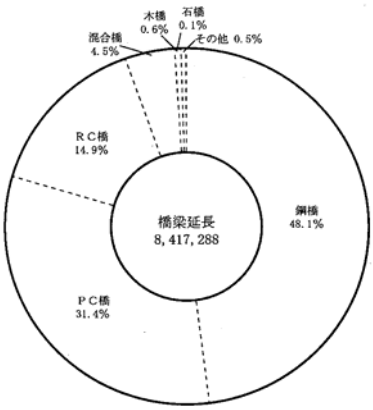


図 1-2.2　橋種別橋梁延長比率

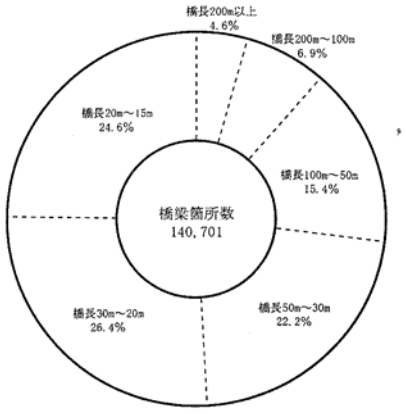


図 1-2.3　橋梁延長別箇所数比率

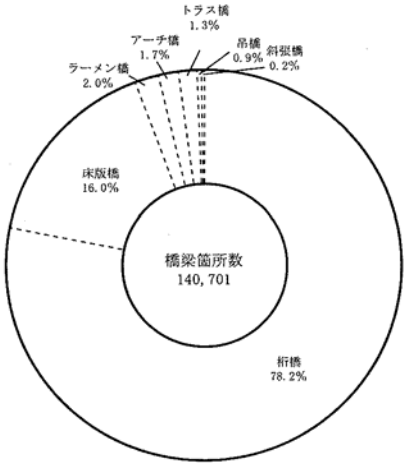


図 1-2.4　橋梁構造形式別橋梁箇所数比率

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)]

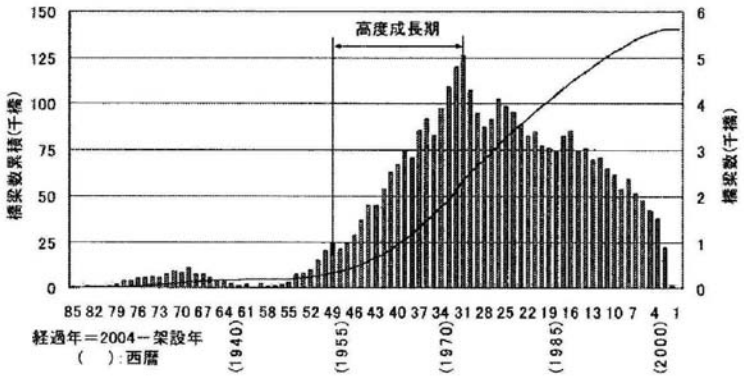


図 1-2.5　総道路橋数と建設数の推移

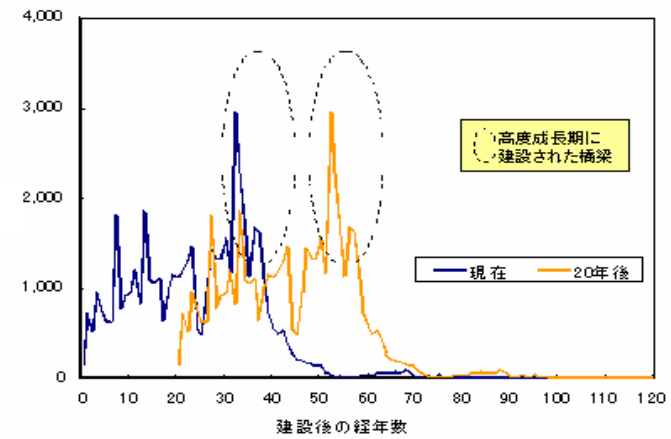


図 1-2.6　橋梁群の平均年齢

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．

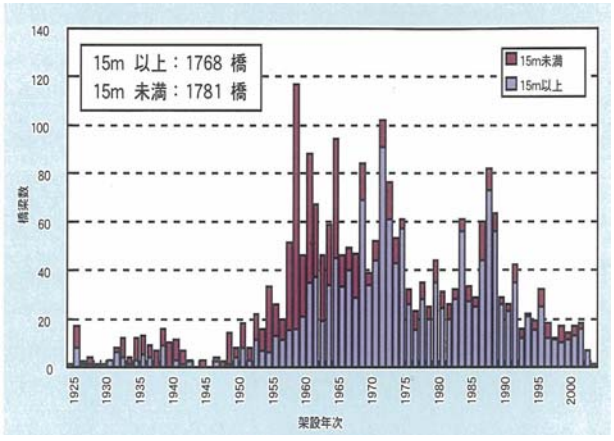


図 1-2.7　橋梁の架設数と竣工年 [4)]

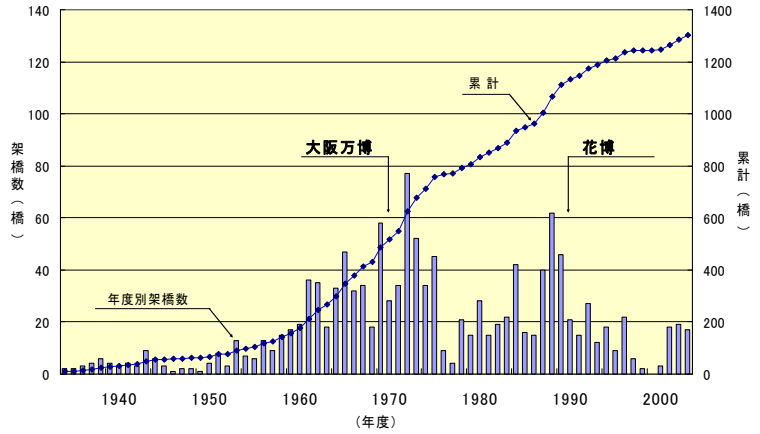


図 1-2.8　イベント情報と架橋数

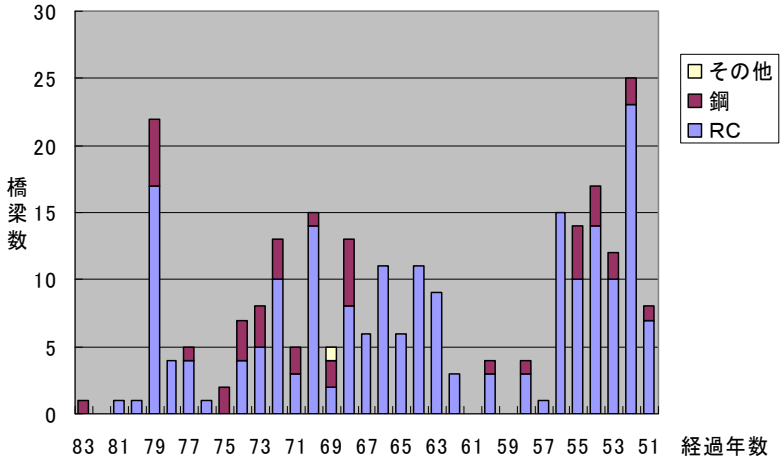


図 1-2.9　架橋数の内訳

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)]

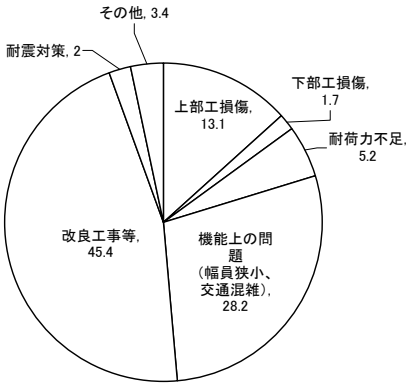


図 1-2.10　架け替えの理由

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)]．

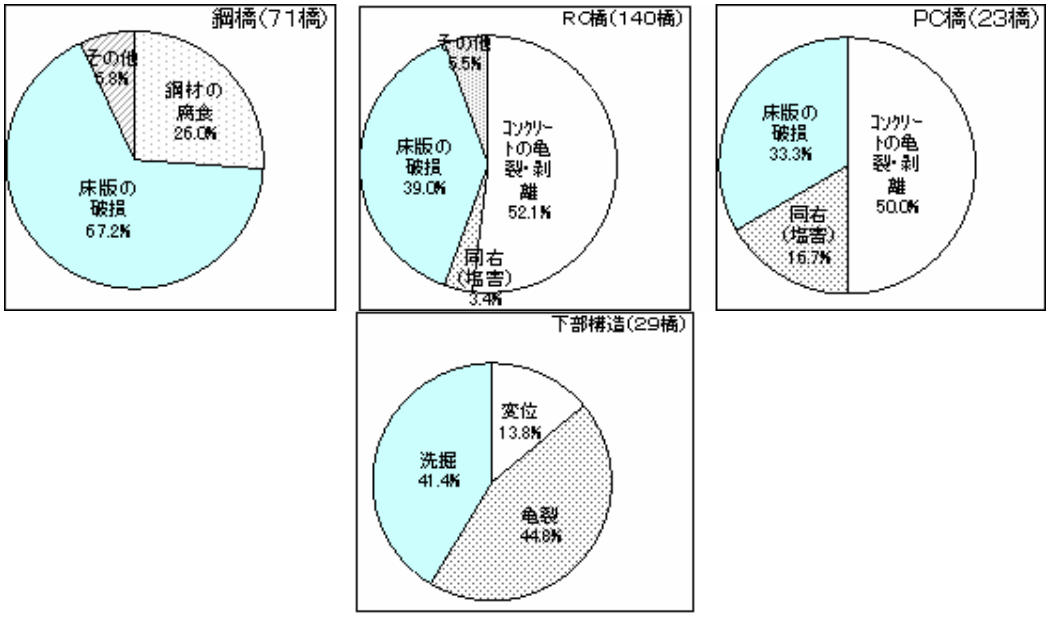


図 1-2.11　橋梁の架け替え理由

【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．

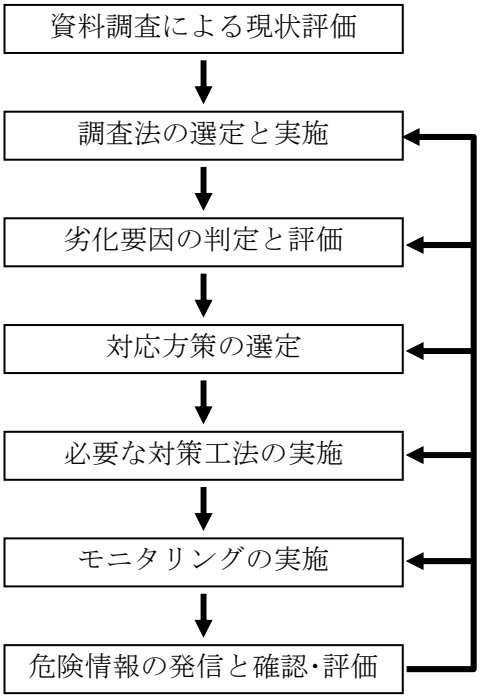


図 1-3.1　インフラ･セキュリティ･システムの基本フレーム図

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.

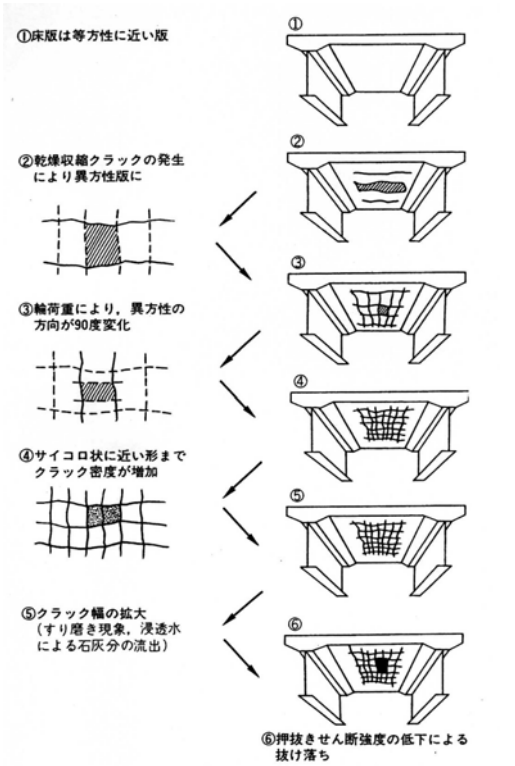


図 1-4.1　RC 床版の疲労劣化

(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.

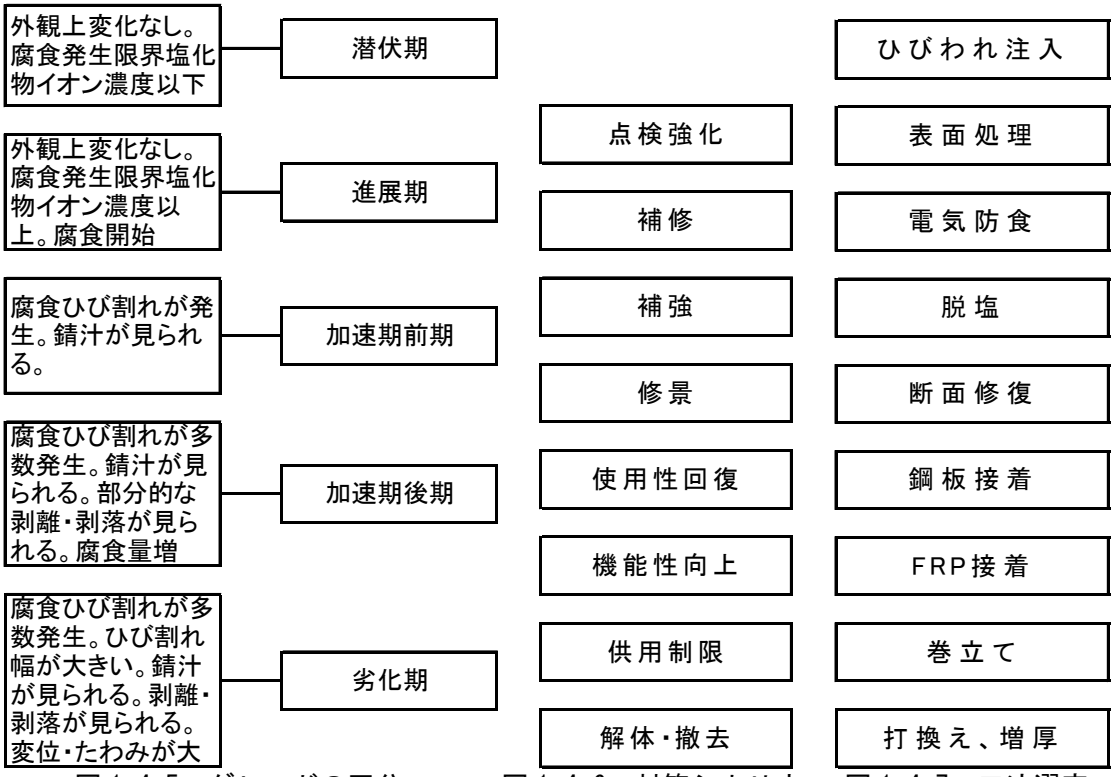


図 1-4.5　グレードの区分　　図 1-4.6　対策シナリオ　　図 1-4.7　工法選定

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．

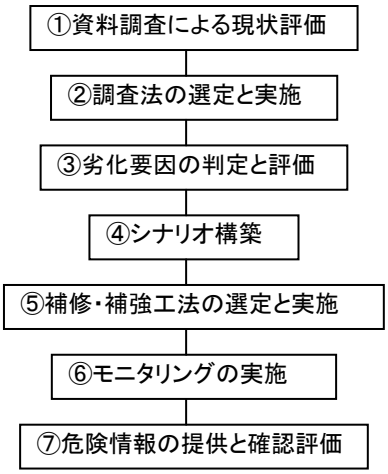


図 1-4.8　ASR 劣化コンクリート構造物のインフラセキュリティシステム(案)

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．

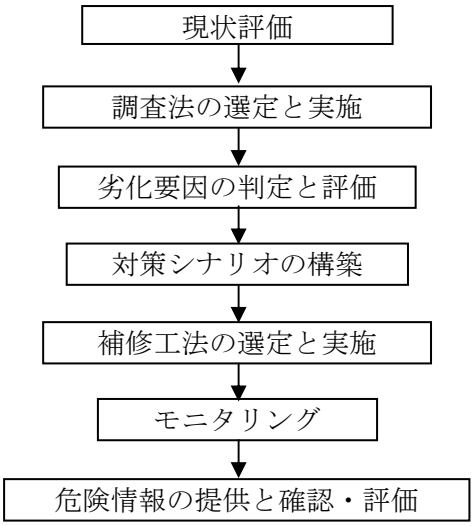


図 1-4.9　凍害対策選定フロー

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．

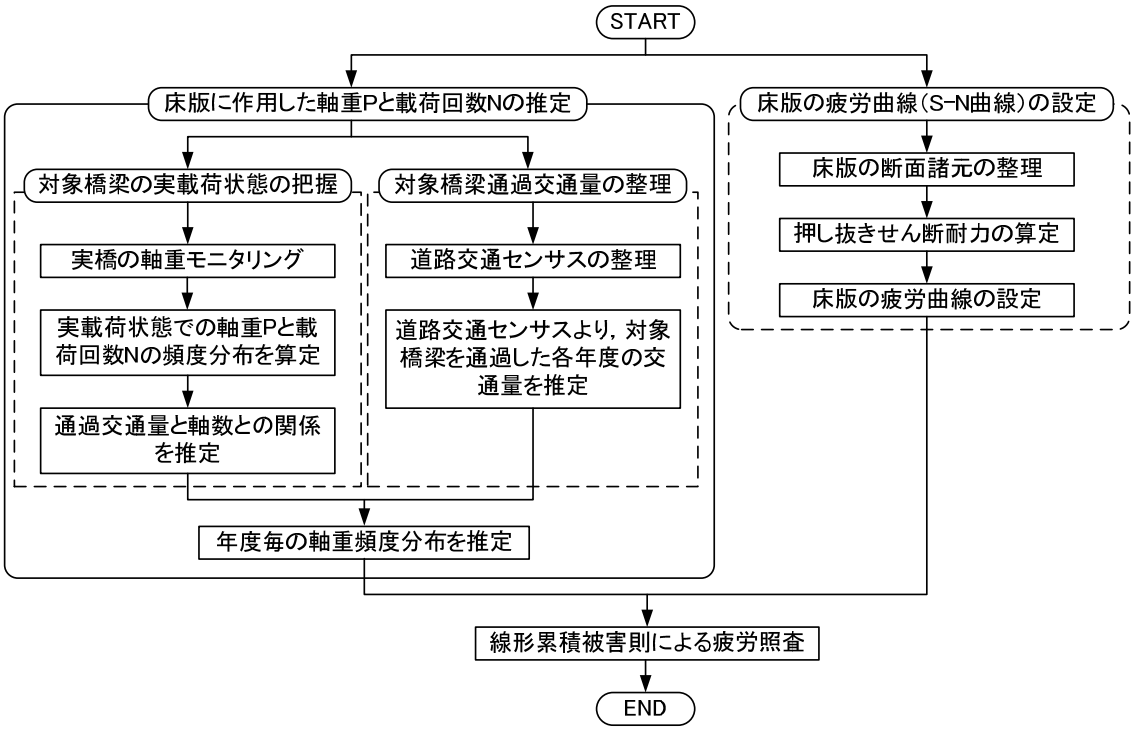


図 1-4.10 評価フロー

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．