平成 19 年度

既設橋の最適延命化方策の評価・策定に関する研究
（第１回中間報告）

全体概要

平成 20 年１月

既設橋の最適延命化方策の評価・策定に関する
研究プロジェクトチーム

はじめに

昨年 10 月 26 日午後６時 30 分から「橋が危ない」と題して近畿の橋の現状が報じられた．６分 10 秒．ＮＨＫ大阪発のローカルニュース番組の枠内ではあったが，そのインパクトは決して小さくなく，一般市民にはあたかも“安全神話”が崩れたようなあるいは，常識が常識でなくなったような大きな衝撃となって伝わった．「えぇ，うちの近所のあの橋もアカンの？」「そんなん，お金かけて，はよ修理してもらわんと．」「怖くて通られへんやん！」うんぬんである．アメリカ・ミネソタ州の橋梁崩落事故の前後から，国内でも橋梁の安全性を揺るがす事故・現象があちこちに見え始め，危惧するところである．

本来，安心安全で豊かな社会生活と産業活動を支える社会基盤とりわけ橋梁は，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．現在，橋長 15m以上の橋梁数でいうと 15 万橋を超えている．戦後，1954 年（昭和 29 年）にスタートした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．各地の幹線道路では，大型車交通量が４割を超えたり，夜間交通量が昼間を上回ったりしており，設計荷重をはるかに上回るものも確認されている．

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シナリオを検討し，路線網や個別の橋梁に適用しようと考える．合わせて， 適用可能な新技術・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以下のことを進めることとした．

・延命化のための“道しるべ”をつくろう！
・最適延命化方策のシナリオ作りをしよう！

特に“道しるべ”作りについては，中堅・若手の技術者が各種維持管理の局面において適切な方策が採れるよう技術的伴侶となる成果・システム構築を手がけた．

建設事業等に対する社会的な信頼度の揺らぎや全体工事規模の縮小傾向が続き，07 年問題による影響のみならず人材の流動要因が増えており，豊かな経験を持つ技術者が減少している．複雑で高度な計測，診断，補修計画の立案等の維持管理業務は増加の一途であり，戦略的で予防的な対応が求められる中，業務や工事に齟齬をきたすことのないよう各方面からの働きかけが重要である．他方，一般市民や利用者等にも橋梁等社会基盤の適切な維持管理について，広く理解を求める行動も今後不可欠であろう．

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，既設橋の最適延命化方策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，橋梁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 19 年度延命化プロジェクトの研究目的と概要

今後飛躍的に増大する橋梁の高齢化に対応するため，健全性を把握し適切に補修補強を施して橋梁の延命化を図ることが重要である．本研究では，橋梁群の維持管理作業を地域レベルで最適に配分するために，各種環境情報と信頼性評価法に基づく相対的な橋梁の健全度評価法の提案を行う．また個別橋梁に対し，劣化現象に応じた最適な評価法・調査法・補修補強工法を選定できる支援システムを提案するとともに，これらを統合した管理システムの提案を行う．

また延命化方策の評価や策定に必要なデータベースの取得を目的として，旧プロジェクトにおいて構築されたモニタリングシステムによる交通データの解析を引き続き実施するとともに，その他の交通情報，気象情報を含めた環境情報を合わせて，橋梁の健全度を相対的に評価できるシナリオの提案と評価を行う．

最終的な成果目標として，各種橋梁群に対する最適延命化シナリオの提案と，最適な延命化方策を採るための調査計測手法や補修補強工法の選定ソフトを拡充・高度化し，これらを統合した「インフラセキュリティシステム」の提案を行う．

平成 19 年度の延命化プロジェクトでは，旧プロジェクト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）選定フローの拡充や，鋼橋に対するモニタリングの継続とデータの解析を行うとともに，新たに評価判定フローの作成を試み，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．

また評価判定フローの作成では，技術選定フローにおける評価判定のプロセスを具体化するとともに，インフラ・マネジメントに対しての新しい方策（シナリオ）を検討する．ただし 19 年度では，劣化要因を三大要因に絞り検討を行う．

平成 19 年度　プロジェクト研究成果の要約

1) 技術選定フローにおける評価判定のプロセスを具体化し，評価選定フローの基本を示すことができた．また最適延命化方策のシナリオ選定に関する基本を示せた．
2) 現状の調査計測技術をブレイクダウンするとともに，調査計測選定フローを高度化した．
3) モニタリングシステムにより取得されたデータを分析し，交通センサスを利用した橋梁評価の可能性を示すことができた．

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	工学研究科都市環境工学専攻	准教授
塩谷　智基	京都大学	工学研究科都市社会工学専攻	准教授
山本　貴士	京都大学	工学研究科社会基盤工学専攻	助教
大島　義信*3)	京都大学	工学研究科都市環境工学専攻	助教

【官】

加藤　俊昌	国土交通省近畿地方整備局	道路部	地域道路調整官
野中　砂男	国土交通省近畿地方整備局	道路部道路管理課	課長
伊藤　繁之	国土交通省近畿地方整備局	近畿技術事務所	副所長
中川　圭正	国土交通省近畿地方整備局	道路部道路管理課	課長補佐
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
石川　次郎	(財)海洋架橋・橋梁調査会	近畿支部	支部長
狩野　裕之	(財)海洋架橋・橋梁調査会	近畿支部技術第三課	課長
辻森　和美	(財)道路保全技術センター	近畿支部	支部長
山下　和彦	(財)道路保全技術センター	近畿支部構造課	課長

【産】

ー WG1（性能評価）ー

中山　昭二*3)	㈱ソーキ	産学官連携ｵﾌｨｽ・新技術推進ｾﾝﾀｰ　ｾﾝﾀｰ長
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㈱	関西支店土木部設計ｸﾞﾙｰﾌﾟ　ｸﾞﾙｰﾌﾟ長
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	ｼｮｰﾎﾞﾝﾄﾞ建設㈱	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㈱	保全技術系ｸﾞﾙｰﾌﾟ　統括ﾘｰﾀﾞｰ
太田　弘次	中央復建ｺﾝｻﾙﾀﾝﾂ㈱	保全技術系ｸﾞﾙｰﾌﾟ　主任
宮原　哲	日本技術開発㈱	大阪支社道路・交通部　部長
庄司　和晃	日本技術開発㈱	大阪支社道路・交通部構造・橋梁ｸﾞﾙｰﾌﾟ
大西　豊	㈱ﾆｭｰｼﾞｪｯｸ	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	㈱ﾆｭｰｼﾞｪｯｸ	大阪本社道路ｸﾞﾙｰﾌﾟ橋梁ﾁｰﾑ　主任
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
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
藤沢　匡尚	ﾊﾟｼﾌｨｯｸｺﾝｻﾙﾀﾝﾂ㈱	大阪本社交通技術部耐震・橋梁保全ｸﾞﾙｰﾌﾟ
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
児玉　孝	㈱修成建設ｺﾝｻﾙﾀﾝﾄ	技術本部構造部　部長
中嶋　裕和	㈱修成建設ｺﾝｻﾙﾀﾝﾄ	技術本部構造部　主査

能登	宥愿	橋梁技術塾	塾長
真鍋	英規*4)	㈱富士ﾋﾟｰ・ｴｽ	西日本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㈱	大阪支店技術部技術課　主任
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
高橋	謙一	ｵﾘｴﾝﾀﾙ白石㈱	大阪支店開発企画部ﾒﾝﾃﾅﾝｽﾁｰﾑ　担当副部長
井隼	俊也	ｵﾘｴﾝﾀﾙ白石㈱	大阪支店施工・技術部技術ﾁｰﾑ　課長
橋村	義人	計測技研㈱	統括部長
鞆	一	ＪＦＥｴﾝｼﾞﾆｱﾘﾝｸﾞ㈱	鋼構造事業部開発・ﾌﾟﾛｼﾞｪｸﾄ室　室長(部長)
小林	貞之	㈱間組	大阪支店土木部　工事部長
張	建東	㈱ﾋﾟｰ・ｴｽ三菱	技術本部土木技術部　ｸﾞﾙｰﾌﾟﾘｰﾀﾞｰ
小林	仁	㈱ﾋﾟｰ・ｴｽ三菱	大阪支店土木統括部　技術部長代理
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
松下	裕明	日立造船鉄構㈱	鉄構設計部橋梁設計１課　課長代理
宮本	則幸	㈱計測ﾘｻｰﾁｺﾝｻﾙﾀﾝﾄ	企画開発部　部長
高崎	廣明	㈱東京測器研究所	東京営業所　所長
佐藤	達也	㈱東京測器研究所	計測技術部計測課　課長代理
廣井	幸夫	ﾋﾟｰｼｰ橋梁㈱	西日本支社管理技術部　部長
越野	英樹	昭和ｺﾝｸﾘｰﾄ工業㈱	大阪支店設計課
金海	鉦	㈱国際建設技術研究所	技術部　部長
狩野	裕之	(財)海洋架橋・橋梁調査会	前掲
山下	和彦	(財)道路保全技術ｾﾝﾀｰ	前掲

－ WG3（補修補強技術）－

金好	昭彦*4)	大鉄工業㈱	前掲
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
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
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
木本	輝幸	川田工業㈱	橋梁事業部大阪技術部設計一課 課長代理
江良	和徳	極東工業㈱	前掲
為石	昌宏	㈱鴻池組	大阪本店土木技術部 主任
宇野	洋志城	佐藤工業㈱	技術研究所 主任研究員
市原	和彦	佐藤工業㈱	大阪支店土木事業部土木部土木課　課長
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㈱	大阪支店土木事業部土木ｸﾞﾙｰﾌﾟ技術ﾁｰﾑ　課長
重金	治彦	飛島建設㈱	大阪支店奈良営業所　所長
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
北川	淳一	三菱重工橋梁ｴﾝｼﾞﾆｱﾘﾝｸﾞ㈱	橋梁技術部設計２ｸﾞﾙｰﾌﾟ

－ 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
市原	和彦	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(WG)主査

総目次

第 0 編　全体概要
第 1 編　WG1　シナリオ策定と評価・判定手法の展開
第 2 編　WG2　調査・計測技術の展開
第 3 編　WG3　補修・補強技術の展開
第 4 編　WG4　鋼橋の延命化方策とモニタリングシステムの実装

平成 19 年度

既設橋の最適延命化方策の評価・策定に関する研究

WG1
～シナリオ策定と評価・判定手法の展開～

中間報告書

平成 20 年 1 月

既設橋の最適延命化方策の評価・策定に関する
研究プロジェクトチーム

目次

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　健全度評価フローの作成　1-7
4.1　コンクリート橋の三大劣化要因と評価フロー　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
4.2　鋼橋の劣化要因と評価フロー　1-21
4.2.1　疲労破壊　1-21
4.2.2　腐食劣化

5　今後の展開　1-23

1　概要

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．

日本の近代化とともに，また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．アメリカ・ミネソタ州の橋梁崩落事故と前後して，国内の橋梁においても安全性を揺るがす事故・現象が続発している．

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補強工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，路線と橋梁の各種特性に注目し，重交通下にある路線や厳しい立地環境条件に晒されている地域道路網の代表的橋梁を選定する．この橋梁に対し，継続的モニタリングシステムを構築するとともにそこから得られるデータを基に，早期警戒に重点を置いた「インフラセキュリティシステム」を提案する．

「インフラセキュリティシステム」は，一般社会に目を向けた時，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．本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．

これまでに現地で構築した常時遠隔モニタリングシステムにより計測された通行荷重の実データ等について，各種の分析と評価を行うが，それらは第４編に記述する．

実測値を基に，Ｕ橋の鉄筋コンクリート床版の疲労損傷度の算出を行うとともに，既往の補強工法の補強（延命）効果についても，評価を試みる．代表的橋梁の実測データ等から橋梁群や路線の特性を推定することで，情報価値はさらに高まるものと考えている．

非破壊，非接触，遠隔，早期発見等のキーワードがより重要度を増すものと考える．特に劣化や損傷の生じた部位や程度がおぼろげながらでも把握できれば，その詳細を確認する手立てや補修補強等の対策工法はあまたある．より合理的かつ効果的なシステム作りを目指すものである．

2　既設構造物の現状

現在，橋長 15m 以上の道路橋は 15 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)]．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)]．

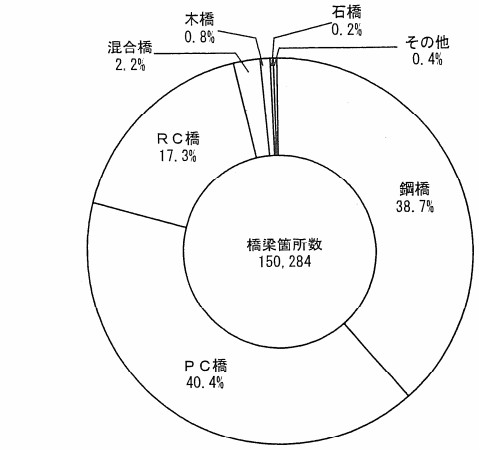


図 1-2.1　橋種別橋梁箇所数比率

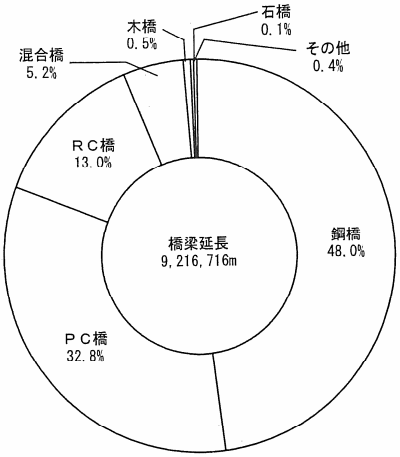


図 1-2.2　橋種別橋梁延長比率

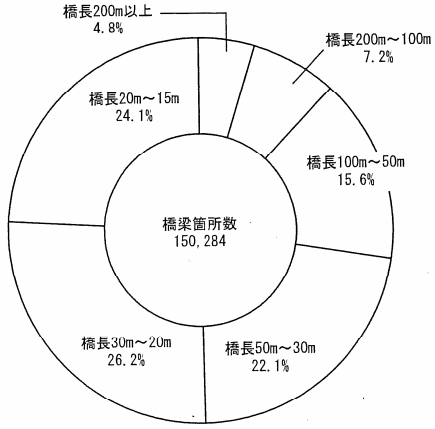


図 1-2.3　橋梁延長別箇所数比率

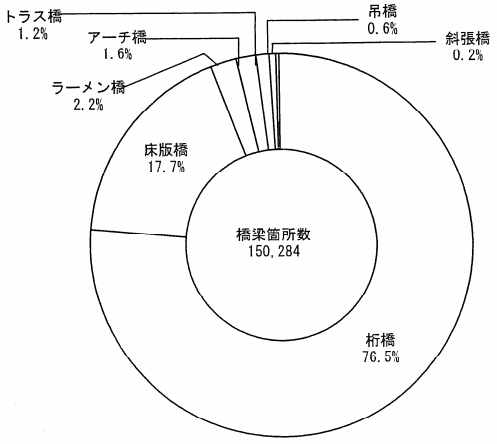


図 1-2.4　橋梁構造形式別橋梁箇所数比率

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)]

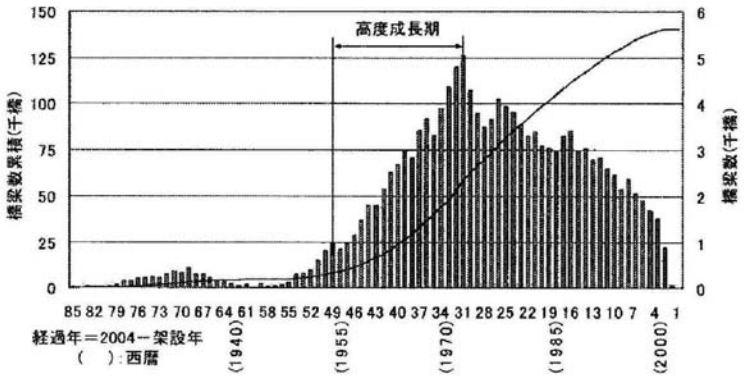


図 1-2.5　総道路橋数と建設数の推移

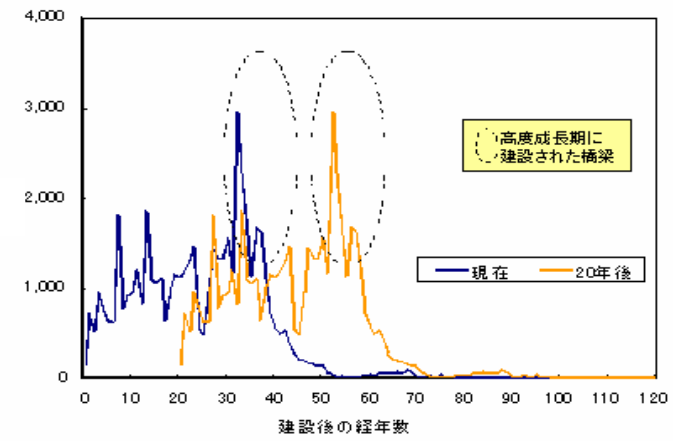


図 1-2.6　橋梁群の平均年齢

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[3]．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．

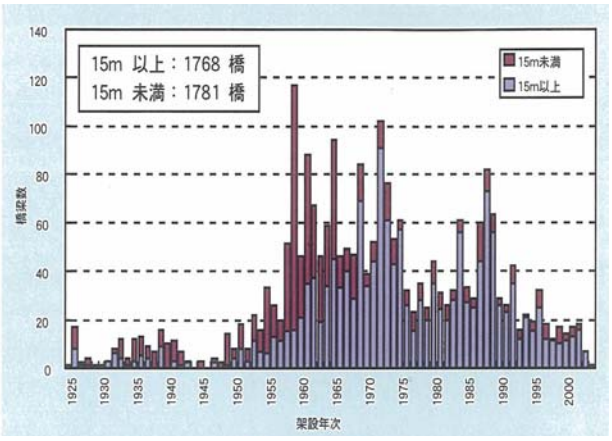


図 1-2.7　橋梁の架設数と竣工年[3]

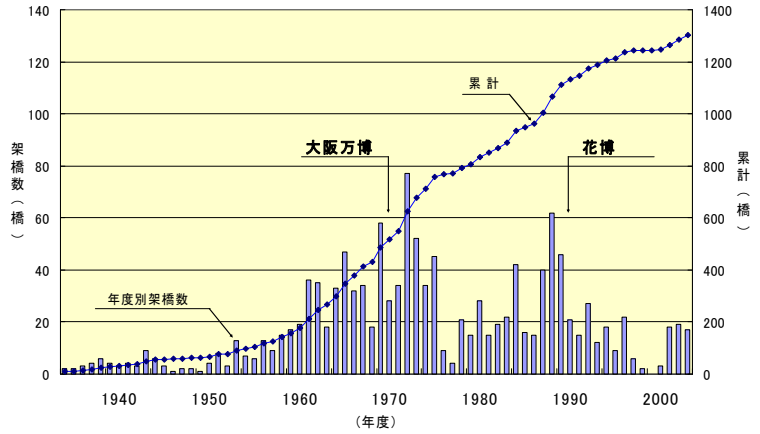


図 1-2.8　イベント情報と架橋数

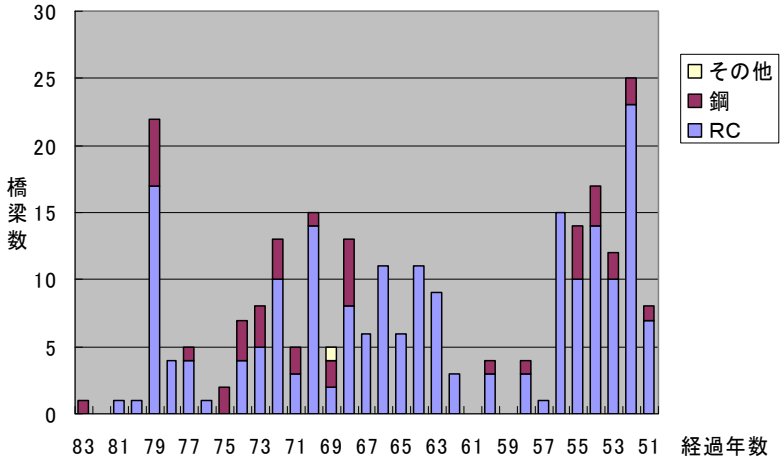


図 1-2.9　架橋数の内訳

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)]

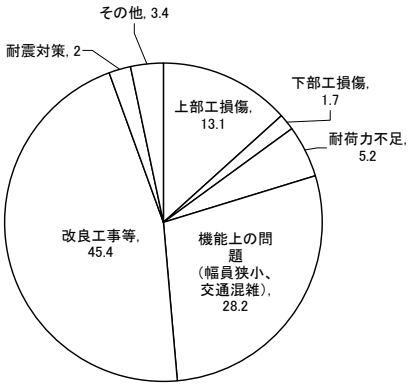


図 1-2.10　架け替えの理由

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 [4]．

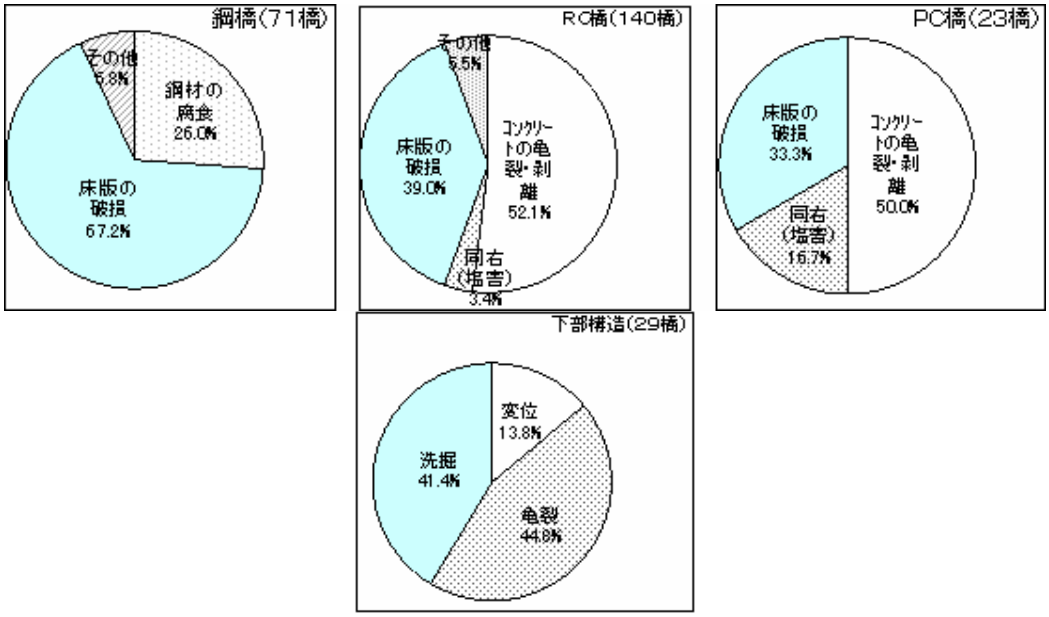


図 1-2.11　橋梁の架け替え理由

【参考文献】
1)　国土交通省道路局企画課監修：道路統計年報 2007，平成 19 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)　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
4)　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

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．

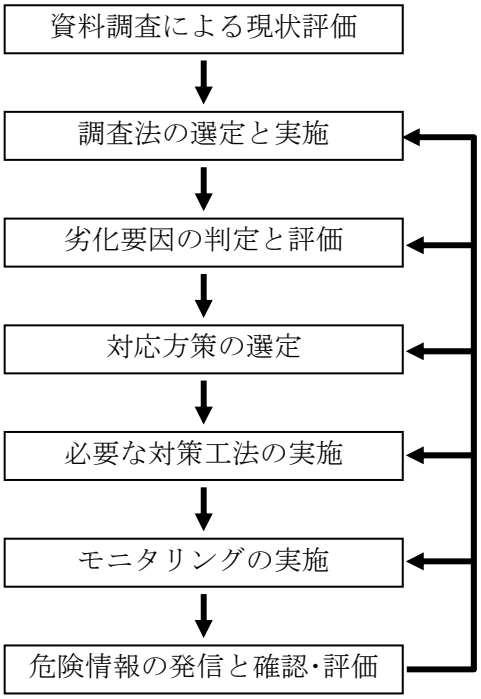


図 1-3.1　インフラ･セキュリティ･システムの基本フレーム図

4　健全度評価フローの作成

ここでは，コンクリート橋の主な劣化要因である疲労ひび割れ，塩害，アルカリ骨材反応と，鋼橋の主な劣化要因である腐食，疲労に焦点を当て，それぞれの劣化過程に対する健全度評価フローを示すとともに，最適シナリオの考え方について基本を示す.

4.1　コンクリート橋の三大劣化要因と評価フロー

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.

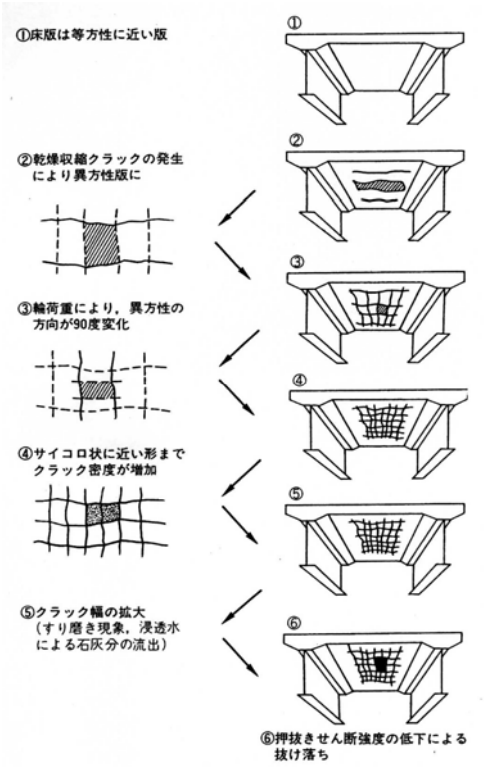


図 1-4.1　RC 床版の疲労劣化

(2)　健全度評価フロー

床版疲労ひび割れに対する健全度評価フローを**図 1-4.2** に示す．調査項目は，現状の劣化過程を特定するものと劣化に対するポテンシャル（劣化速度）を推定するものとに二分される．劣化過程を特定するための調査は目視が中心となるが，加速期以降ではひびわれ密度が飽和することがあるため，ひび割れ挙動の調査やたわみ量調査などを併用する．

一方，ポテンシャルを評価する調査としては，疲労に対する抵抗性を把握するための資料調査（床版厚，配力鉄筋量，防水層の有無，補修・補強履歴等）やコンクリートの強度・品質を把握する試験，疲労環境を把握するための交通量調査等が挙げられる．

対策を選定する際には，変状が軽微であってもポテンシャルが大である場合には予防保全的な対策を選定するなど，現状の劣化過程と劣化に対するポテンシャルから総合的に評価する必要がある．また，当面対策を施さない場合や軽微な対策のみで経過観察する場合には，遠隔モニタリングシステムを導入して点検強化することが望ましい．

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)　健全度評価フロー

床版疲労ひび割れに対する健全度評価フロー案を**図 1-4.3** に示す．疲労ひび割れ同様，劣化過程の評価を行うと同時にポテンシャルの評価を行い，対策シナリオのマトリクスでの評価へとつなげていく．また**表 1-4.3** に示すマトリクス中の工法の選定は，劣化過程（ステージ）と劣化ポテンシャルの程度に応じて選択する．

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)　健全度評価フロー

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 1-4.4**

に，健全度評価の基本フローを示す．また対策シナリオの考え方について，表 1-4.4 以下に示す．

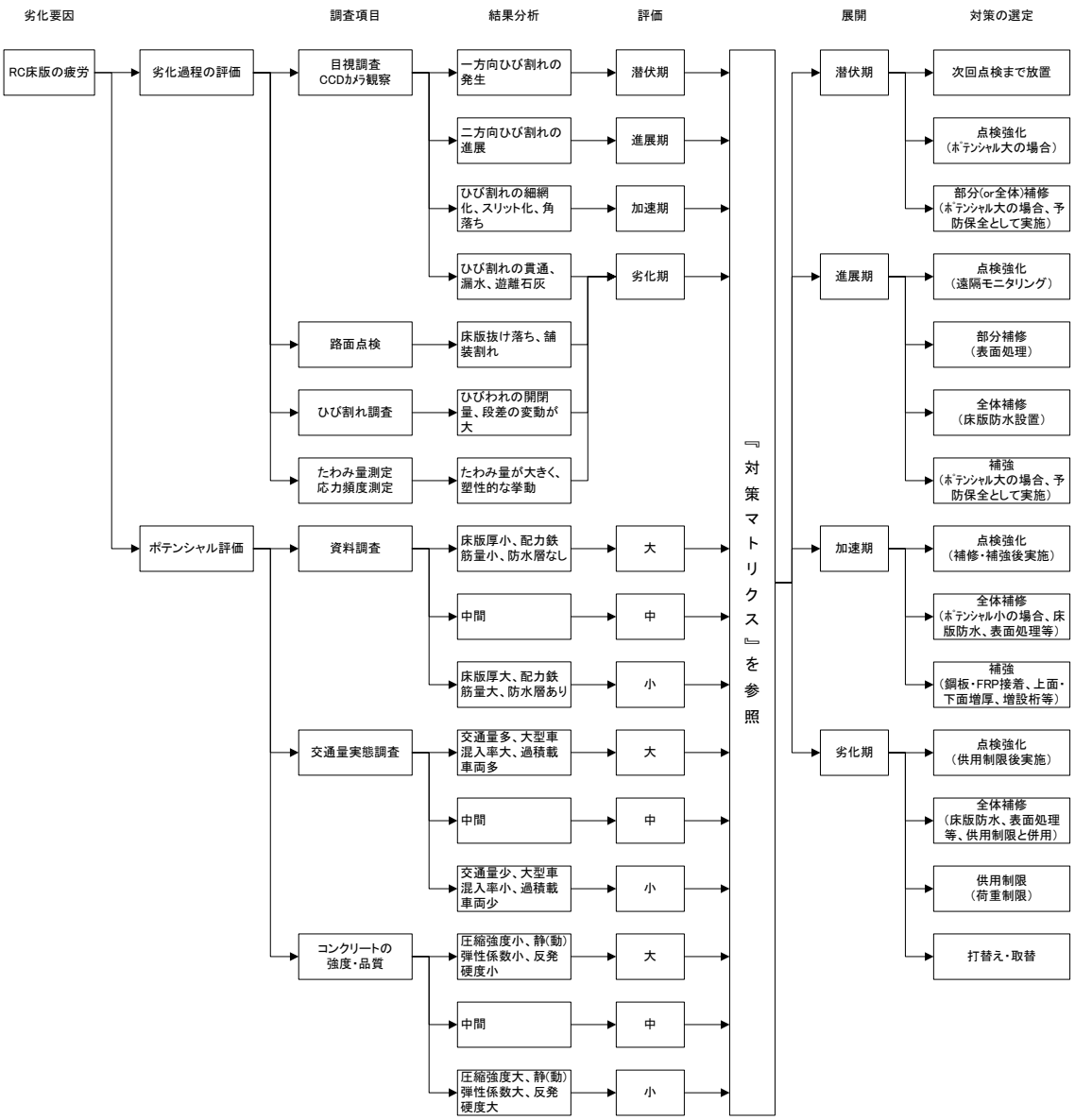


図 1-4.2　RC 床版疲労の健全度評価フロー

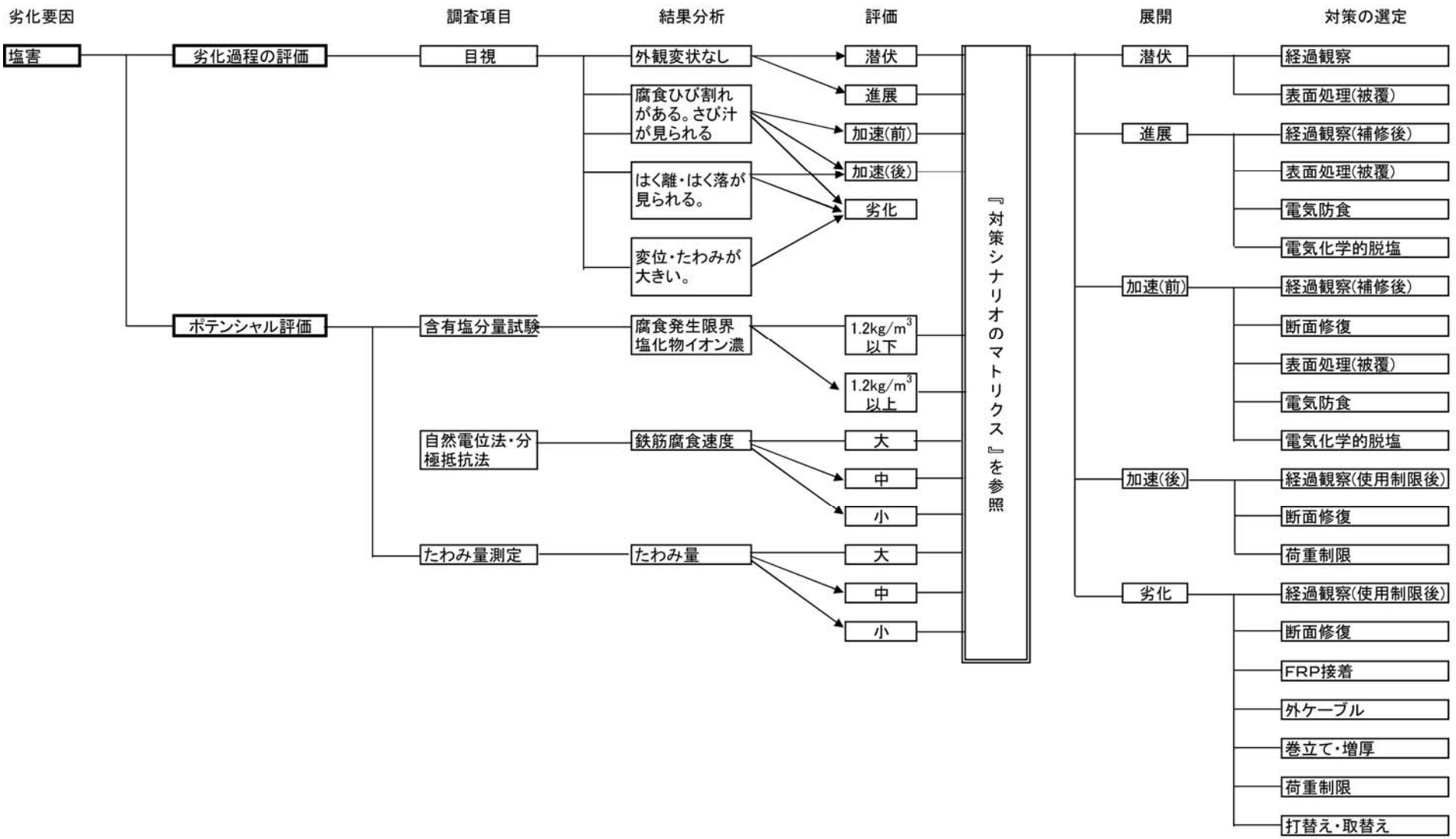


図 1-4.3　塩害評価のフロー案

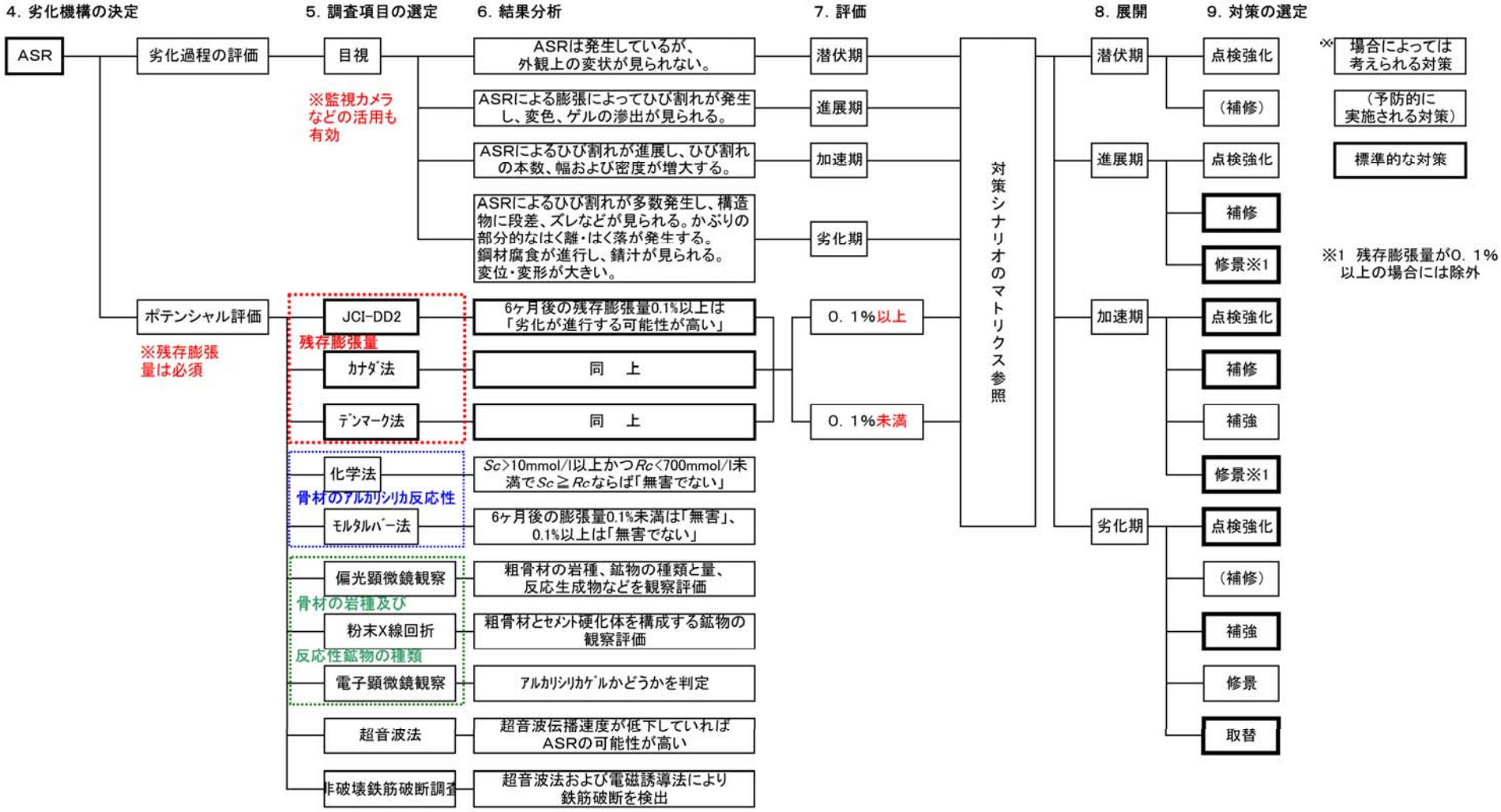


図 1-4.4　ASR 評価のフロー案

表 1-4.2　疲労ひび割れにおける対策シナリオのマトリクス

対策シナリオ	①対策なし	②存置 （継続調査）	③予防保全	④部分補修	⑤全体補修	⑥補強	⑦供用制限	⑧更新
対策内容	次回点検まで放置	点検強化 （点検頻度の増加、点検項目の追加、または常時監視）	劣化因子の遮断・除去	第三者影響度、美観・景観の改善	疲労耐久性の向上	耐荷力・剛性の回復、向上	要求性能の一部制限	解体撤去 再構築
Ⅰ（潜伏期）	放置	点検強化	床版防水の設置 表面処理（被覆）	----	----	----	----	----
Ⅱ（進展期）	----	（補修後） 点検強化	鋼板・FRP接着 上面・下面増厚 増設桁	表面処理（被覆）	床版防水の設置	----	----	----
Ⅲ（加速期）	----	（補強後） 点検強化	----	----	床版防水の設置 表面処理（被覆）	鋼板・FRP接着 上面・下面増厚 増設桁	----	----
Ⅳ（劣化期）	----	（供用制限後） 点検強化	----	----	床版防水の設置 表面処理（被覆）	----	荷重制限	打替え・取替

表 1-4.3　塩害における対策シナリオのマトリクス

2．1次選定（対策シナリオおよび対策グレードの選定）

対策シナリオ	①対策なし	②存置 （継続調査）	③予防保全	④暫定補修	⑤完全補修	⑥補強	⑦供用制限	⑧更新
対策内容	次回点検まで放置	点検強化 （点検頻度の増加、点検項目の追加、または常時監視）	劣化因子の遮断・除去	第三者影響度、美観・景観の改善	耐久性の向上	耐荷力の回復、向上	要求性能の一部制限	解体撤去 再構築
Ⅰ-1（潜伏期）	放置	点検強化	表面処理（被覆）	----	----	----	----	----
Ⅰ-2（進展期）	----	（補修後） 点検強化	表面処理（被覆） 電気防食 電気化学的脱塩	表面処理（被覆）	----	----	----	----
Ⅱ-1（加速期前期）	----	（補強後） 点検強化	----	----	表面処理（被覆） 断面修復、電気防食 電気化学的脱塩	----	----	----
Ⅱ-2（加速期後期）	----	（供用制限後） 点検強化	----	----	断面修復	----	荷重制限	----
Ⅲ（劣化期）	----	（供用制限後） 点検強化	----	----	断面修復	FRP接着 外ケーブル 巻立て、増厚	荷重制限	打替え・取替

表 1-4.4　ASR における対策シナリオのマトリクス

対策シナリオのマトリクス

対策のシナリオ	①対策なし	②継続調査	③予防保全	④暫定補修	⑤完全補修	⑥補強（＋補修）	⑦供用制限	⑧更新
対策内容	次回点検まで静置	点検強化（点検頻度・項目の増加または常時監視）	外部からの水分侵入防止	外部からの水分侵入防止	水分侵入防止＋劣化部除去	膨張拘束、耐荷力の向上	重車両の通行制限	対策内容
Ⅰ（潜伏期）	静置	点検強化	表面処理（被覆、含浸）	－	－	－	－	－
Ⅱ（進展期）	－	点検強化	表面処理（被覆、含浸）	表面処理、ひび割れ注入	表面処理、ひび割れ注入、断面修復	－	－	－
Ⅲ（加速期）	－	点検強化	－	表面処理、ひび割れ注入	表面処理、ひび割れ注入、断面修復	プレストレス導入、鋼板・FRP巻立て、鋼板・FRP接着、外ケーブル	－	－
Ⅳ（劣化期）	－	点検強化	－	－	表面処理、ひび割れ注入、断面修復	プレストレス導入、鋼板・FRP巻立て、鋼板・FRP接着、	重車両の通行制限	解体撤去、架け替え

4.3　鋼橋の劣化要因と評価フロー

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1)を参照されたい．

4.3.1　疲労破壊

(1)　劣化の形態

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2)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)　健全度評価フロー

以上の劣化形態を踏まえ，**図1-4.5**に疲労破壊の健全度評価フローを示す．　対策シナリオのマトリクスについては，現在作成中である．

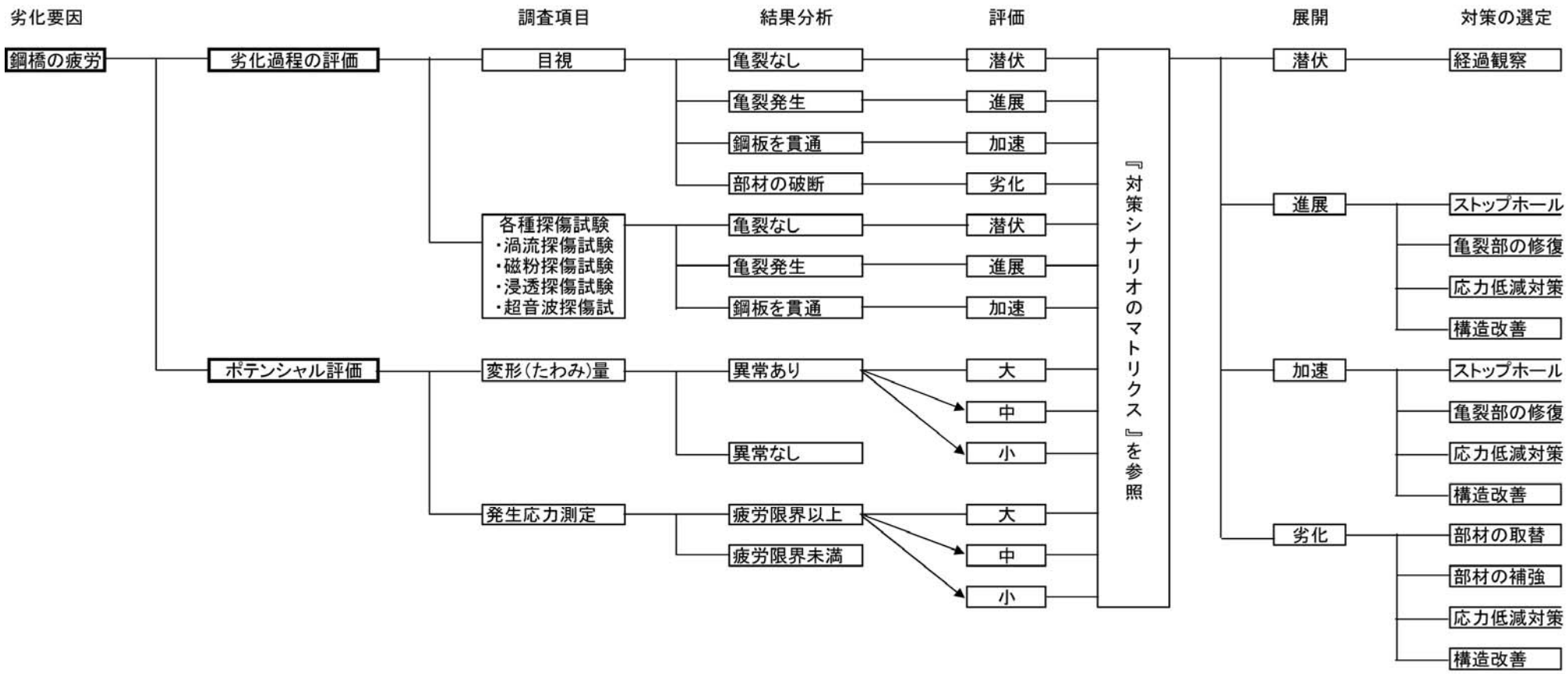


図 1-4.5　鋼橋疲労破壊に対する評価のフロー案

4.3.2　腐食劣化

(1)　劣化の形態

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)　健全度評価フロー

以上の劣化形態を踏まえ，**図1-4.6**に腐食劣化の健全度評価フローを示す．　対策シナリオのマトリクスについては，現在作成中である．

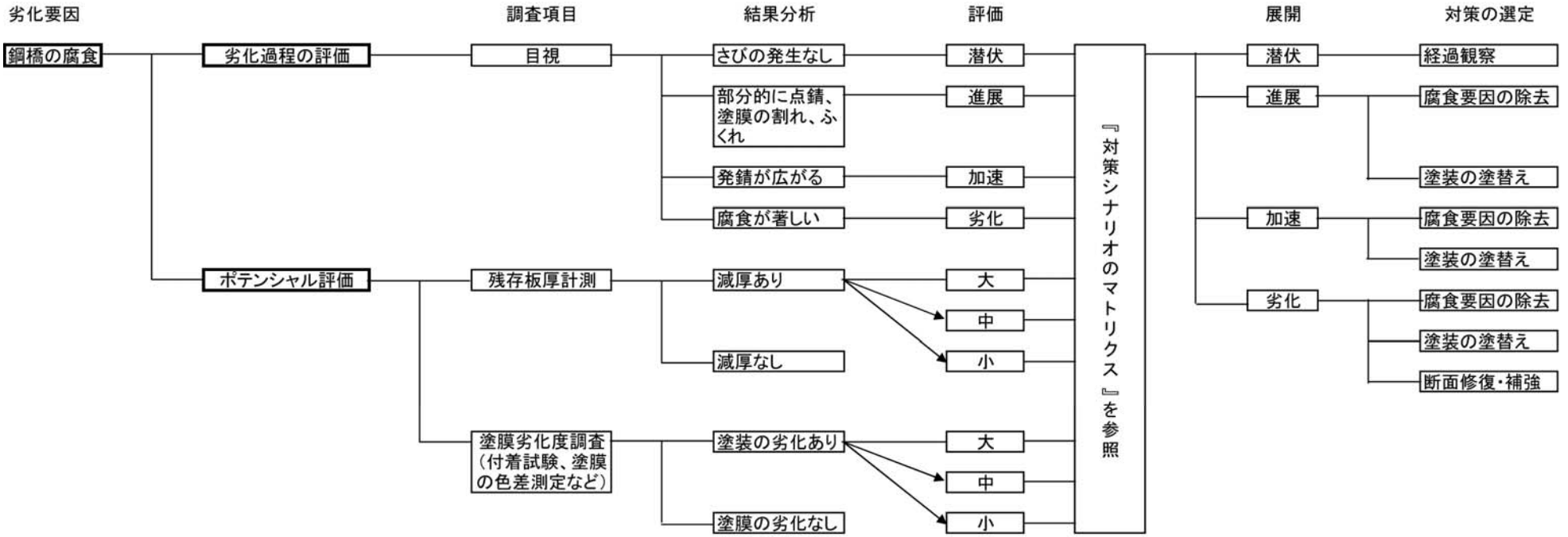


図 1-4.6　鋼橋腐食劣化に対する評価のフロー案

5　今後の展開

健全度評価WGでは，本プロジェクトにおいて主に以下の二つの課題を設定している．

1)　健全度評価フローの作成
2)　最適延命化方策のシナリオ策定

初年度では，主にコンクリート構造物の三大要因について評価フローの作成を行った．また評価フローの作成とともに，最適な延命化方策のシナリオ作りを行い，対策シナリオのマトリクスについて素案を提示することができた．今後，各種劣化要因における評価フローの作成を進めるとともに，対策シナリオの充実化を図る．また鋼橋の疲労劣化に対しては，モニタリングや交通センサスなどのデータベースを活用し，より客観的な対策シナリオの選定を行っていく予定である．

参考文献

1)　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㈱，1996.
2)　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

平成 19 年度

既設橋の最適延命化方策の評価・策定に関する研究

WG2
～調査・計測技術の展開～

中間報告書

平成 20 年 1 月

既設橋の最適延命化方策の評価・策定に関する
研究プロジェクトチーム

目次

1. 概要

2. 調査・計測技術の選定
  2.1 調査・計測技術の選定
  2.2 調査・計測技術の選定の分類
    2.2.1 共通
    2.2.2 一次選定（外観調査）
    2.2.3 二次選定（詳細調査）
  2.3 コンクリート構造物の各劣化機能に応じた調査・計測技術
    2.3.1 塩害に対する調査・計測技術
    2.3.2 アルカリ骨材反応に対する調査・計測技術
    2.3.3 RC 床版の疲労に対する調査・計測技術
    2.3.4 中性化に対する調査・計測技術
    2.3.5 凍害に対する調査・計測技術
    2.3.6 化学的浸食に対する調査・計測技術
    2.3.7 PC 鋼材関連の劣化に対する調査・計測技術
  2.4 鋼構造物の各劣化機能に応じた調査・計測技術
    2.4.1 腐食に対する調査・計測技術
    2.4.2 亀裂に対する調査・計測技術

3. 調査・計測技術の現状と課題
  3.1 調査・計測技術の現状
  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
  3.3 モニタリング
    3.3.1 概要
    3.3.2 モニタリングの目的と位置付け
    3.3.3 遠隔モニタリングシステム

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およびその調査から判定できる事項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

構造物の維持管理に関する調査・計測技術は多岐にわたっており，その多数ある技術をどのように選定するのかを明確にする必要がある．調査・計測技術は、一般的な外観調査を主目的として用いられるもの、各劣化機構を特定しその劣化度合い、進行度等を詳細調査するものに大別できる．ここでは、調査・計測技術を維持管理上の点検の種類・方法の観点から大きく2つに分け選定する手法を示す。

2.2. 調査・計測技術の選定の分類

2.2.1 共通

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評価・判定，劣化度合の把握，今後の劣化予測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．

本項では，図2.2.1-1に記すよう上記点検内容を一次選定，二次選定と分別し，それぞれの調査・計測技術について詳述するとともに，各選定により得られる評価・判定内容についても記述する．

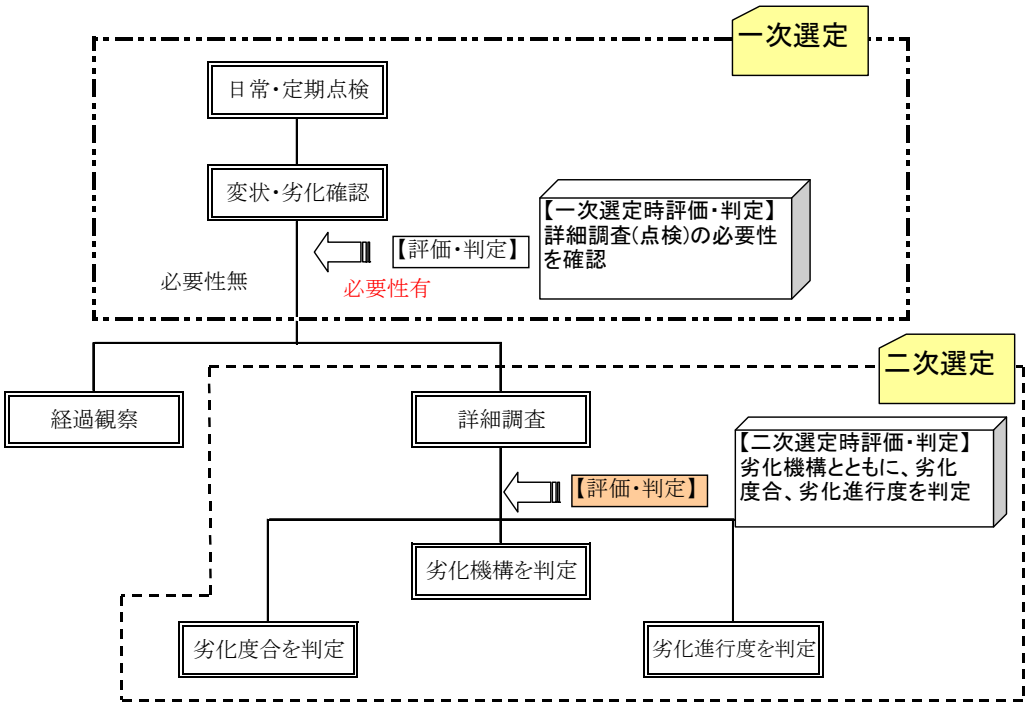


図2.2.1-1　点検から評価・判定への流れ

2.2.2　一次選定（日常点検，定期点検）

一般に，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，腐食等の劣化の度合や程度，特徴を把握するための調査を行い，劣化機構の推定および詳細調査の必要性の判定を行う．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調査技術として，デジタルカメラを活用した技術，赤外線サーモグラフィー，ノンプリズムトータルステーションを活用した技術がある．

(1)　目視調査

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 2.2.1-1 に示す通りであり，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2.2.1－1　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，デジタルカメラによる画像から直接ひび割れ図を作成する技術が実用化されている．

(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．

(4)　ノンプリズムトータルステーション

ノンプリズムトータルステーションにひび割れゲージを組み合わせることにより，構造物から離れた所から非接触でひび割れの幅，形状を正確に測定し記録できる．

2.2.3　二次選定（詳細調査）

二次選定においては，一次選定にて得られた情報・データを基に，【劣化機構】，【劣化の度合（どの程度劣化が進行しているか)】，【今後の劣化進行度（劣化予測)】を評価・判定することを目的とした調査・計測を行う．

次項以後に，コンクリート構造物，鋼構造物各々の劣化に対する調査・計測技術について詳述する．

2.3.　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

2.3.1　塩害に対する調査・計測技術

塩害に対する調査は，一次選定にて得られた情報・データ（外観調査結果，構造物データ，使用，環境条件等）を基に，調査項目，調査方法を選定する．コンクリート中に発錆限界量以上の塩化物ｲｵﾝが存在する原因は，飛来塩分や凍結防止剤などの外来塩分がコンクリート表面から浸透拡散することにより鋼材まで達する場合と，施工時，十分に塩分除去されていない海砂を使用したコンクリートを打設したため，内包塩分として，鋼材近傍に施工時から存在している場合がある．塩害については，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，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)劣化機構を判定する調査・計測技術

塩害劣化の判定には，コンクリート中の塩化物ｲｵﾝ量を測定することが重要である．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，化学分析される．化学分析の一例として，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．この方法には全塩分，可溶性塩分の分析方法が基準化されている．また，全塩分の分析限定で少ない試料にて短期間で分析できる簡易分析法としてJCI-SC5「硬化コンクリート中に含まれる全塩分の簡易分析方法」が良く用いられている．

「JCI-SC4（硬化コンクリート中に含まれる塩分の分析方法)」

・塩化物ｲｵﾝ選択性電極を用いた電位差滴定法

・クロム酸銀吸光光度法

・硝酸銀滴定法

「JCI-SC5（硬化コンクリート中に含まれる全塩分の簡易分析方法)」

・塩化物ｲｵﾝ選択性電極を用いた電位差滴定法

・クロム酸銀吸光光度法

「その他の試験法」

・塩化物ｲｵﾝ浸透深さ法(ﾌﾙｵﾚｾｲﾝﾅﾄﾘｳﾑ法)

・表面分析法（EPMA法：電子ﾌﾟﾛｰﾌﾞﾏｲｸﾛｱﾅﾗｲｻﾞｰ，WDS法：波長分散型Ｘ線分光器）

・表面分析法(近赤外分光ｲﾒｰｼﾞﾝｸﾞ法)

・その他

(2) 劣化の度合を判定する調査・計測技術

塩害による劣化度合の調査については，上記した塩化物ｲｵﾝ量の測定とともに，鉄筋腐食度合を測定することも重要である．実構造物より採取した鉄筋において，腐食面積率，腐食減量等の測定を行うことにより，劣化度合の判定を行う．

(3) 今後の劣化進行度（劣化予測）を判定する調査・計測技術

塩害により劣化した構造物について，今後の劣化進行度を把握する場合，現状の塩素ｲｵﾝ浸透状況の確認に加え，今後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．塩化物ｲｵﾝの浸透分析（拡散予測）は，フィックの第 2 法則で知られる拡散方程式を用いて行われる．

また, 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．

2.3.2 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，一次選定からの情報・データ（塩害同様）を基に，調査項目，調査方法を選定する．ASRについては，特徴のあるひび割れ形態，アリカリ含有量，さらには膨張量等を把握することが重要である．

(1) 劣化機構を判定する調査・計測技術

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定し，コア採取する必要がある．現在，非破壊検査では

ASRの判定をすることは困難であるため,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．以下にASR劣化機構の判定に用いられる調査・計測技術の一例を記す。

① ひび割れ形状の確認

コンクリート構造物のひび割れ幅や，ひび割れ長さを確認するとともに，ひび割れ形状の計時変化を測定し，ASR劣化の判定を行う．

② 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があり，骨材のアルカリシリカ量によりASR劣化の判定を行う．

③ 残存膨張量

採取コアの残存膨張量を測定することにより，ASR劣化の判定を行う．我が国では，コンクリート中のアルカリシリカ反応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．

④ 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) 劣化の度合を判定する調査・計測技術

ASRの劣化度合の調査については，上記(1)の調査・計測技術に加え，採取コアの圧縮強度，静弾性係数の測定，さらには超音波伝搬速度測定により劣化度合を確認する方法がある．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[4)5)].

(3) 今後の劣化進行度（劣化予測）を判定する調査・計測技術

ASRによる劣化が懸念される構造物における劣化進行予測には,採取したコアの残存膨張量法が良く用いられる．我が国では，前述したJCI-DD2法の他，促進試験とし，3ヶ月にて評価可能なデンマーク法や，14日にて評価可能なカナダ法が良く用いられている．また，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，ASR劣化度合や今後の進行度を判定する技術として，実構造物での検証が行われている[6)7)8)].

2.3.3 鉄筋コンクリート床版の疲労に対する調査・計測技術

ＲＣ床版に関する調査項目は，一次選定からの情報・データ（塩害同様）を基に，調査項目，調査方法を選定する．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．外観変状以外のひび割れ挙動，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．

(1) 劣化機構を判定する調査・計測技術

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) 劣化の度合を判定する調査・計測技術

ＲＣ床版の疲労劣化の度合は，ひび割れ形状により推定されることが一般的である．床版の現時点での耐荷特性，劣化度合等把握するためには，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，維持管理に対し非常に有効な手段である．近年，光ファイバー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ーを用いるシステム，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．

(3) 今後の劣化進行度（劣化予測）を判定する調査・計測技術

走行荷重を受けるＲＣ床版の疲労実験から得られたＳ－Ｎ曲線を用い疲労被害則を適用することにより，既存ＲＣ床版の疲労寿命を予測することは可能である．疲労寿命予測に必要となるのは，一日の一方向の交通量，大型車混入率（過積載車含む），車両の軸重量（輪荷重）特性，車線分担率等である．これらの情報は現地で交通量調査を行い，また輪荷重を測定できるシステムを併用することによって得ることができる．ＲＣ床版の輪荷重によるひび割れの開閉特性から輪荷重を特定するシステムもある．

2.3.4　中性化に対する調査・計測技術

中性化に関する調査項目は，一次選定からの情報・データ（塩害同様）を基に，調査項目，調査方法を選定する．中性化とは，大気中の二酸化炭素がコンクリートに侵入し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，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・膨張し，この膨張によりコンクリートにひび割れを発生させる．ひび割れを介し，鋼材に供給される酸素等の腐食因子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) 劣化機構を判定する調査・計測技術

中性化劣化と判定を行う上で，中性化の深さを算定することが重要である．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．

(2) 劣化の度合を判定する調査・計測技術

中性化による劣化度合の調査については，中性化深さとかぶり厚の関係を明確化することが重要である．さらには塩害同様に，実構造物より採取した鉄筋において，腐食面積率，腐食減量等の測定，自然電位測定，分極抵抗測定等により，劣化度合の判定を行う．

(3) 今後の劣化進行度（劣化予測）を判定する調査・計測技術

中性化劣化の進行度を判定するには，中性化深さとかぶり厚の関係を確認した上で，中性化劣化速度の算定や，促進中性化試験の活用が有効である．また，分極抵抗法により鉄筋の腐食速度を推定することにより，中性化の劣化進行度を判定する方法も有効である．

2.3.5 凍害に対する調査・計測技術

凍害に関する調査項目は，一次選定からの情報・データ（塩害同様）を基に，調査項目，調査方法を選定する．凍害とは，コンクリート中の水分が0℃以下になった時に，凍結し体積膨張することにより発生するもので，長期間にわたる凍結と融解の繰り返しにより，コンクリートが劣化する現象である．コンクリート構造物が凍害を受けるとコンクリート表面にスケーリング，ポップアウトや微細ひび割れが生じ，表面から徐々に劣化していくのが特徴である．劣化が進行すると鉄筋の腐食を伴う状態となり，さらに進行すると鉄筋の断面減少が大きくなり，構造物の耐荷力に大きな影響を与えるようになる．

そのため凍害に対する調査では，一次選定で得られる環境条件に加え，コンクリートの品質，気泡や細孔の分布[9)]，鉄筋の腐食状態等に着目する必要がある．

(1) 劣化機構を判定する調査・計測技術

凍害劣化の判定を行う上で，コンクリートの表面劣化状態を確認することは重要である．凍害は前述したように，特徴のある劣化状態（スケーリング，ポップアウトや微細ひび割れ）が生じる．さらに，凍害が生じた構造物はコンクリート表面の反発硬度も低下しやすい状態となっているため，反発硬度の測定も有効な方法である．

(2) 劣化の度合を判定する調査・計測技術

凍害により劣化したコンクリートは，表面の反発硬度が変化しやすい状態であり，反発硬度法による強度推定及び強度分布の推定は，凍害劣化の度合を確認するための有効な調査手法のひとつである．また，凍害により劣化すると超音波伝播速度が遅くなる．その性質を利用し，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．さらに，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，凍害の劣化の度合，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．

鉄筋の腐食状態の確認については，腐食面積率，腐食減量等の測定，自然電位測定，分極抵抗測定等により，劣化度合の判定を行う．

(3) 今後の劣化進行度（劣化予測）を判定する調査・計測技術

凍害の劣化進行度は，前述(2)に記載した反発硬度法や超音波伝播速度にて推定することが可能である．しかし，この際，施工年度，コンクリートの配合（特に空気量），セメントの種類，混和剤の種類・使用量（特にAE剤使用の有無），鉄筋位置，かぶり，補修や点検履歴等，施工時の資料を確認するとともに，気象条件としての気温・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を確認し，劣化推定することが重要である．

2.3.6　化学的侵食に対する調査・計測技術

化学的浸食に関する調査項目は，一次選定からの情報・データ（塩害同様）を基に，調査項目，調査方法を選定する．化学的浸食とは，化学的腐食環境下にあるコンクリート構造物が，腐食物質に接触することにより，接触表面や局部から急速にコンクリートが劣化する現象をいう．一般環境下にある構造物はこれらの化学侵食が問題となることは少なく，温泉地，化学工場，下水道処理施設などで発生する場合が多い．化学的侵食には，温泉水や動植物油による劣化，酸性雨や化学工場による酸性劣化，アルカリ分の溶出に伴う中性化などが含まれる．そのため，化学的侵食に対する調査では，腐食物質の存在や腐食物質の成分を把握することが重要である．

(1) 劣化機構を判定する調査・計測技術

化学的浸食を判定する上で，コンクリートが接触する侵食溶液の種類は極めて重要である．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り発生する．このような腐食性物質について，臭気・ガス探知機等により，腐食物質の存在を確認するとともに，クロマトグラフ，光度計等により腐食性物質の成分分析を行う．

(2) 劣化の度合を判定する調査・計測技術

他の劣化機構同様に，腐食深さやひび割れ形状，コンクリートの物性値（圧縮強度，静弾性係数等）を確認することにより，劣化の度合を判定する．一例として，EPMA（電子線ﾏｲｸﾛｱﾅﾗｲｻﾞｰ）による酸の浸食深さ確認試験や，塩化ﾊﾞﾘｳﾑ混合溶液法により硫酸ｲｵﾝ浸透深さ測定試験等がある．

(3) 今後の劣化進行度（劣化予測）を判定する調査・計測技術

酸性溶液によるコンクリートの化学的腐食の特徴は，浸食が表面から除々に内部へ向かって進行していくことである．上記の反応により表層部のセメント硬化体が軟化し，さらに結合能力を失うと脱落する．酸の浸透がコンクリート内部の物質移動を引き起こしているため，化学的な変化が生じていることに留意しなければならない．このように化学的浸食による劣化進行度を測定する方法としもEPMA（電子線ﾏｲｸﾛｱﾅﾗｲｻﾞｰ）による酸の浸食深さ確認試験は用いられる．

2.3.7　ＰＣ鋼材関連の劣化に対する調査・計測技術

ＰＣ鋼材関連の劣化に関する調査項目は，一次選定からの情報・データ（塩害同様）を基に，調査項目，調査方法を選定する．ＰＣ鋼材関連の主な劣化現象として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．ＰＣ鋼材関連に劣化が生じた場合，ＰＣ鋼材に沿ったひび割れや，ＰＣ鋼材定着部付近での漏水等の変状が発生する．また，ＰＣ鋼材関連の劣化は，目視における確認は困難であり，非破壊的な手法を用いることが多い．

これより，ＰＣ鋼材関連の劣化については，グラウト充填度，非破壊によるＰＣ鋼材破断の有無，残存プレストレス状態を把握することが重要である．

(1) 劣化機構を判定する調査・計測技術

ＰＣ鋼材は耐荷性に大きく影響を与えるものであるため，ＰＣ鋼材関連に劣化が生じた場合，他の劣化機構と異なり，劣化度合や劣化進行度を判定すると同時に緊急の対処（補

修・補強等）を施すケースが多い.

以下にＰＣ鋼材関連の劣化判定に用いる調査・計測技術を目的別に記す.

1） グラウト充填性調査・計測技術

① マルチパスアレイレー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鋼材の残存プレストレス調査・計測技術

① スロットストレス解放法

切削による発生したコンクリートの変位をフラットジャッキにて元に戻すことで応力を測定.

② 鉄筋切断法

はつりだした鉄筋を切断し，解放されるひずみで計測する.

③ ＥＭセンサー法

張力による磁場の変化をセンサーで計測する.

3） ＰＣ鋼材の破断調査・計測技術

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.

4） ＰＣ鋼材定着部損傷の調査・計測技術

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り確認する.

2.4 鋼構造物の各劣化機能に応じた調査・計測技術

2.4.1 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晒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，架橋の地形条件，あるいは漏水や滞水しやすい構造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必要である．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，発見，検出を行うためには，橋梁の各部材に近接することが必要となる．したがって，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，詳細点検を実施することも多くみられる．

鋼道路橋に用いられている防食方法は，塗装，亜鉛めっきで保護する方法と鋼材自身が保護性さびを生じて耐食化する耐候性鋼材に大別される．そのうち，塗装は塗替えが前提であり，適切な塗替え時期の範囲を逸脱しないような調査時期が重要である．

(1)劣化機構を判定する調査・計測技術

塗装や亜鉛めっき橋梁の場合，塗装もしくは亜鉛めっきの劣化限度を超えれば鋼材の腐食が進むため，塗装もしくは亜鉛めっきの劣化が腐食の劣化機構と考えられる．

塗装，亜鉛めっきの劣化や耐候性鋼材の腐食進行の要因としては，①経年数と適用基準，②架橋の地形条件（飛来塩分を受けやすい，桁下が湿潤など），③漏水や滞水しやすい構造ディテール，④凍結防止剤の散布，⑤飛来塩分量などの環境条件が主なものである．

①について，塗装や亜鉛めっきについては良好な環境においても劣化は進むものであること，耐候性鋼材については，保護性さびの形成には10数年以上必要であるため，設計条件を詳細に確認する必要がある。②，③は近接調査によって目視で確認することができる．④は②，③の要因とも輻輳するが，道路管理者へのヒアリング調査により確認することができる．

以上は定性的な劣化要因の把握になるが，定量的な⑤の飛来塩分量の調査方法としては，直接塩分量を計る土研式タンク法，ドライガーゼ法（JIS　Z2381）等が一般的である．最近では，温度，湿度などの腐食因子全てを反映した腐食データを取得することができる「ワッペン試験法」[11)]や，同じく複雑な環境因子の総合作用により発生する鉄の腐食電流を計測する「ACMセンサー」[12)]が実用化されている．

また，塗装膜表面の付着塩分を測定する方法に「拭き取り法」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)劣化の度合を判定する調査・計測技術

1)外観調査

塗装，亜鉛めっきの劣化や耐候性鋼材の保護製さび生成確認は，それぞれ見本写真や指標との比較によってその程度を判定する目視調査（耐候性鋼材の場合は，接写やセロファンテープ試験も含む）が一般的である．塗膜については,橋梁全体の写真撮影から画像処理して劣化度を評価するシステムも開発されている[13)].

塗膜の劣化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．

a)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．

b)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り，塗膜の付着力を測定する方法である．

c)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．

d)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平滑度合が失われていき，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．

2)残存板厚

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．初期値は近傍の健全部を計測することにより得られる．

一方，さび厚さを測る方法として，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．

3)耐候性鋼材のさびの構造調査

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．これらは，劣化をみると言うより保護性さびの生成度を調べるものである．

(3)今後の劣化進行度（劣化予測）を判定する調査・計測技術

塗装や亜鉛めっき橋梁の進行度は，腐食部を地鉄と考えた場合の環境に応じた各種データーブックの値を用いて推定することができる．

耐候性鋼材の場合は(1)の劣化機構を判定する調査・計測技術で紹介した「ワッペン試験法」，「ACMセンサー」により劣化予測を行うことができる．また，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，耐候性鋼材における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．

2.4.2　亀裂に対する調査・計測技術

鋼橋における疲労亀裂は，応力集中部の溶接継手部などの局部的な箇所に発生し，溶接の止端部や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必要である．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．したがって，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)劣化機構を判定する調査・計測技術

疲労亀裂が発生する要因としては，①適用基準，設計内容と大型車の通行量や走行位置，②発生応力や局部応力，③不等沈下や剛性低下，④疲労耐久性，⑤亀裂起点場所が主なものである．疲労に影響する車両は大型車両であるため，①は施工時の設計・計画と現状が大幅に違えばそのことが要因となりうるための調査であり，通過車両重量の測定方法は，主に以下の 2 通りがあげられる．

a)板状の車両重量計測装置で直接重量を測定する．

b)橋梁のひずみの測定データから間接的に重量を求める．

走行位置は，わだち跡をメジャーで直接計測する方法，写真やビデオ撮影から計測する方法がある．

②も設計との違いを調べ，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ためのものである．応力計測はひずみゲージを貼付計測するのが一般的である．

③は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，荷重分配作用による主桁間のたわみ差が上げられる．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．変位の計測方法とし主に以下の2通りがあげられる．

a)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．

b)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．

④は対象部の疲労耐久性を調べるもので，亀裂を進展させるために設けたスリット入り金属箔をひずみゲージのように樹脂ベースに接合した「疲労センサー」が開発されている．これは，部材に貼り付け，ある期間後に点検し，センサーの亀裂進展量を測定することで対象部位の疲労寿命を推定するものである．

⑤は，亀裂の起点を特定することにより，疲労亀裂の要因を特定することができる．溶接止端部を起点とした，ある程度の長さを有するものは目視点検によって確認することができるが，微細なものについては浸透探傷試験や磁粉探傷試験が用いられる．ルートを起点とするものは目視では確認できないため，非破壊の超音波探傷試験が用いられる．構造

的に問題が無い場合は削り込みを行い，磁粉探傷試験とを繰返し行って起点を探ることも行なわれている．これらの方法の詳細は以下の通りである．

a)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．耐候性鋼材の場合も錆汁が発見の起点となる．

b)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．

c)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を調査する方法である．

d)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)劣化の度合を判定する調査・計測技術

疲労亀裂は進展し，断面欠損が徐々に増加するため，亀裂長さが劣化の度合いを示すものと考えられる．亀裂長さは，(1)劣化機構を判定する調査・計測技術で紹介した，目視点検，浸透探傷試験，磁粉探傷試験，超音波探傷試験によって計測することができる．

(3)今後の劣化進行度（劣化予測）を判定する調査・計測技術

劣化進行度を直接測る技術としては，(1)劣化機構を判定する調査・計測技術で紹介した疲労センサーがある．それによらない場合は，継続的に進展長さを計測することにより将来予測を行うことができる．また，亀裂先端部の局部応力を計測し破壊力学の手法を用いた疲労亀裂進展解析[14)]によって予測することもできる．

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、ＩＴ技術の発展によって、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

特に、ＩＣタグセンサ、無線センサに代表される小型、ワイヤレスのセンサ、システムの開発が進展しており、試験計測などが実橋でおこなわれるようになってきている。

3.3　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 3.3.3-1 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.

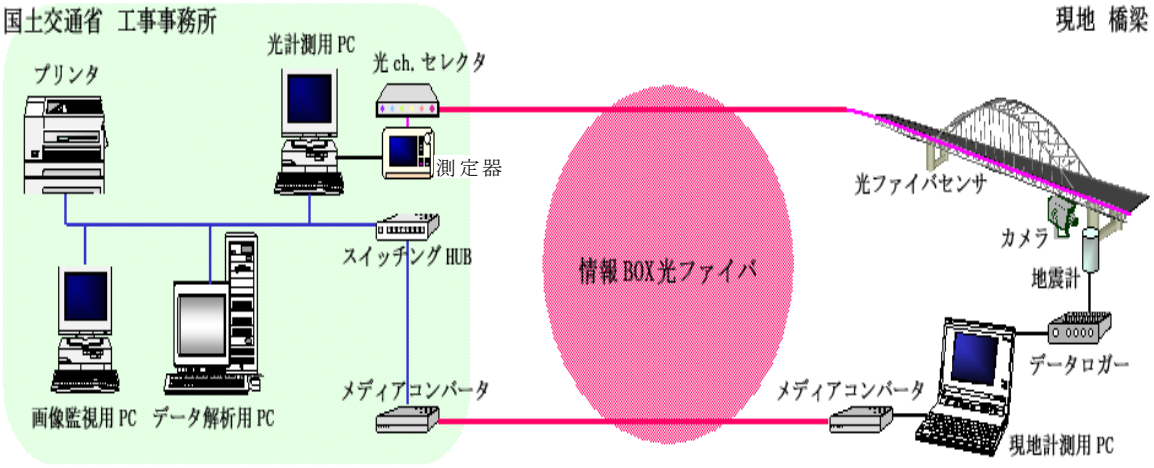


図 3.3.3-1　　通信システムの基本構成例

(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) (社)日本鋼構造協会, 耐候性鋼橋梁の可能性と新しい技術, JSSCテクニカルレポートNo.73, 2006.10
12) 篠原ら；腐食防食協会，第40回討論会予稿集，495（1993）
13) 藤原，三宅，赤井，河野，出川，画像処理による鋼橋塗膜の劣化度判定法に関する研究，土木学会論文集，No.598，pp.85～96，1998
14) 日本鋼構造協会，鋼構造物の疲労設計指針・同解説，技報堂出版，1993.4

平成 19 年度

既設橋の最適延命化方策の評価・策定に関する研究

WG3
～補修・補強工法の展開～

中間報告書

平成 20 年 1 月

既設橋の最適延命化方策の評価・策定に関する
研究プロジェクトチーム

新都市社会技術融合創造研究会

『既設橋の最適延命化方策の評価・策定に関する研究プロジェクト』

補修補強技術WG（WG３）　委員構成

プロジェクトリーダー	：	宮川　豊章（京都大学）
幹事長	：	中山　昭二（㈱ソーキ）
WG３主査	：	金好　昭彦（大鉄工業㈱）

委　員

芦田　公伸	電気化学工業㈱
市原　和彦	佐藤工業㈱
○岩井　稔	鹿島建設㈱
宇野　洋志城	佐藤工業㈱
※江良　和徳	極東工業㈱
小川　光博	青木あすなろ建設㈱
川添　靖展	㈱淺沼組
北川　淳一	三菱重工橋梁エンジニアリング㈱
木本　輝幸	川田工業㈱
○佐古　周一	㈱ハルテック
重金　治彦	飛島建設㈱
○田口　雅彦	東急建設㈱
竹田　宣典	㈱大林組
為石　昌宏	㈱鴻池組
○辻子　雅則	飛島建設㈱
早川　健司	東急建設㈱
丸屋　剛	大成建設㈱

（50音順，敬称略）
○：TGチーフ
※：事務局

既設橋の最適延命化方策の評価・策定に関する研究

《 報 告 書 目 次 》

第1章　概要 ・・・

3.1.2 アルカリ骨材反応への対応策 ・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・ 37
(1) 対応策の要求性能 ・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・ 37
(2) 要求性能の評価方法 ・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・ 37
(3) 要求性能に応じた対策工と具体的工法 ・・・・・・・・・・・・・・・・・・・ 38
3.1.3 疲労への対応策 ・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・ 42
(1) 対応策の要求性能 ・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・ 42
(2) 要求性能の評価方法 ・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・ 42
(3) 要求性能に応じた対策工と具体的工法 ・・・・・・・・・・・・・・・・・・・ 43
3.1.4 中性化への対応策 ・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・ 46
(1) 対応策の要求性能 ・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・ 46
(2) 要求性能の評価方法 ・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・ 46
(3) 要求性能に応じた対策工と具体的工法 ・・・・・・・・・・・・・・・・・・・ 47
3.1.5 凍害への対応策 ・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・ 51
(1) 対応策の要求性能 ・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・ 51
(2) 要求性能の評価方法 ・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・ 51
(3) 要求性能に応じた対策工と具体的工法 ・・・・・・・・・・・・・・・・・・・ 51
3.1.6 化学的侵食への対応策 ・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・ 55
(1) 対応策の要求性能 ・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・ 55
(2) 要求性能の評価方法 ・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・ 55
(3) 要求性能に応じた対策工と具体的工法 ・・・・・・・・・・・・・・・・・・・ 56

3.2 プレストレストコンクリート構造物への対応策 ・・・・・・・・・・・・・・・・ 60
3.2.1 PC鋼材関連の劣化への対応策 ・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・ 60
(1) 対応策の要求性能 ・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・ 60
(2) 要求性能の評価方法 ・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・ 60
(3) 要求性能に応じた対策工と具体的工法 ・・・・・・・・・・・・・・・・・・・ 60

3.3 鋼構造物への対応策 ・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・ 65
3.3.1 腐食への対応策 ・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・ 65
(1) 対応策の要求性能 ・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・ 65
(2) 要求性能の評価方法 ・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・ 65
(3) 要求性能に応じた対策工と具体的工法 ・・・・・・・・・・・・・・・・・・・ 65
3.3.2 亀裂への対応策 ・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・ 67
(1) 対応策の要求性能 ・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・ 67
(2) 要求性能の評価方法 ・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・ 67
(3) 要求性能に応じた対策工と具体的工法 ・・・・・・・・・・・・・・・・・・・ 67
3.3.3 その他劣化への対応策 ・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・ 70
(1) 高力ボルトの劣化 ・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・ 70
(2) 全体系の劣化 ・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・ 70

第4章 延命化対策工選定システム ・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・ 72
4.1 システム概要 ・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・ 72
4.2 システム操作方法 ・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・ 74

第5章 今後の方針 ・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・ 79

参考資料 ・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・ 80

第１章　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, 鋼橋などの既設橋に着目した延命化対策をテーマとして実施した研究内容を次に示した．

(1)　既設橋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既設橋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，対象既設橋の劣化要因･劣化過程などを入力すれば，その既設橋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．

(4)　ユーザーに判断を委ねないことを前提として、プロトタイプ“ 延命化対策工選定システム ”を実用化するまで発展させるために今後解決すべき主な課題を整理し「今後の方針」としてまとめた．

第２章　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

(1)　塩害

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．

一般に，コンクリート中の細孔は，セメントの水和反応による飽和水酸化カルシウム水溶液で満たされている．飽和水酸化カルシウム水溶液の pH 値は 12～13 であるので，コンクリートは強アルカリ性を示す．鉄筋などの鉄は，強アルカリ性水溶液中では鉄表面が不動態状態になる．それゆえ，コンクリート中の鉄筋は防食され，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，鉄筋表面の不動態被膜が破壊される．また，コンクリート中には十分な量の酸素と水が存在するため，不働態被膜が破壊されると鉄(鉄筋)は酸化反応をおこし，腐食が開始する．

なお，コンクリート中に塩化物イオンが存在する理由として，①不適切な海砂や塩化物含有混和剤の利用などによるコンクリート材料から供給される場合(内在塩分という)，②沿岸部の海水飛沫や冬季間の融雪剤散布などによる塩化物の浸透(飛来塩分という)の 2 種類がある．いずれの場合においても，許容濃度以上の塩化物イオンがコンクリート中に存在する場合，鉄筋の腐食が発生する．

コンクリートの塩害の進行にともなうコンクリート構造物の劣化のメカニズムは以下のように説明される．

1) コンクリート中に許容量以上の塩化物イオンが存在する．
2) 塩化物イオンにより鉄筋表面の不動態被膜が破壊される．
3) コンクリート中に存在する酸素と水分により，鉄筋表面の酸化反応が発生する(腐食の開始)．
4) 腐食生成物の膨張圧によりコンクリートに引張応力が発生する．
5) 引張応力がコンクリートの引張強度を超え，コンクリートにひび割れが発生する．
6) ひび割れにより酸素と水分の供給量が増加し，鉄筋腐食が加速する．
7) 腐食が加速するにともないひび割れ幅が増加する．
8) ひび割れ幅の増加とともにコンクリートの浮き・はく離が生じる．
9) 鉄筋の断面欠損，コンクリートのはく落により，構造体としての耐荷力の低下が発生する．

塩害劣化の要因と劣化現象，劣化指標との関連を**表 2.1.1(1)-1** に示す．

また，塩害による劣化の事例を**写真 2.1.1(1)-1** と**写真 2.1.1(1)-2** に示す．**写真 2.1.1(1)-1** は橋脚の主筋に沿ったひび割れ，**写真 2.1.1(2)-2** は橋梁のひび割れとはく離の事例である．

表 2.1.1(1)-1　塩害の劣化機構と要因，指標，現象の関連

劣化機構	劣化要因	劣化現象	劣化指標
塩害	塩化物イオン	コンクリート中の鋼材の腐食が塩化物イオンにより促進され，コンクリートのひび割れやはく離，鋼材の断面減少を引き起こす劣化現象．	塩化物イオン濃度 鋼材腐食量

出典：「2001 年制定　コンクリート標準示方書(維持管理編)　土木学会」



写真 2.1.1(1)-1　橋梁(脚部)



写真 2.1.1(1)-2　橋梁(はり部)

(2)　アルカリ骨材反応

アルカリ骨材反応とは，セメントと反応性骨材との反応によってコンクリートが膨張する劣化現象であり，一般にアルカリシリカ反応（以下，ASRと記す)，アルカリ炭酸塩反応およびアルカリシリケート反応の3種類に分類されている．我が国で被害が主に報告されているのはASRであるため，以下，ASRについて記述する．

コンクリートのASRとそれに伴う構造物の劣化は，一般的に以下のようなメカニズムで進行すると考えられている．

1) 骨材中のシリカ成分とセメント中のアルカリ金属イオン（Na^+，K^+）とが化学反応を起こす．
2) その化学反応の結果，吸水膨張性のゲル状物質（アルカリシリカゲル）を生成する．
3) アルカリシリカゲルが水分供給を受けることにより，局部的な容積膨張を生じる．
4) その膨張力によりコンクリートにひび割れを発生させる．

コンクリートの異常膨張は，アルカリシリカゲルの吸水膨張に起因するものである．**写真2.1.1(2)-1**は，反応性骨材の周囲に生成したアルカリシリカゲルを示したものである．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．我が国で確認されている反応性骨材には，火山岩が起源の岩石（安山岩など）や堆積岩が起源の岩石（チャートなど）などがある．



写真 2.1.1(2)-1　アルカリシリカゲルの生成状況
出典：「コンクリート診断技術'03（基礎編）
(社)日本コンクリート工学協会」

反応性骨材の周囲に生成したアルカリシリカゲルは，水分の供給により膨張する．その膨張によってコンクリート内の組織に内部応力が発生し，反応性骨材周囲のセメントペーストを破壊する．時間の経過に伴ってASRが進行すると，反応性骨材の周囲に発生した微細なひび割れが進展し，やがてコンクリート構造物の表面に巨視的なひび割れが発生する．

ASRの劣化要因，劣化現象および劣化指標の関連を**表2.1.1(2)-1**に示す．

コンクリート構造物に生じるASRによる劣化は，ひび割れ，変位・変形，段差，変色，ゲルの滲出な

表 2.1.1(2)－1　ASR の劣化機構と要因，指標，現象の関連

劣化機構	劣化要因	劣化現象	劣化指標
アルカリ骨材反応	反応性骨材	骨材中に含まれる反応性シリカ鉱物や炭酸塩岩を有する骨材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膨張やひび割れを発生させる劣化現象.	膨張量 （ひび割れ）

出典：「2001 年制定　コンクリート標準示方書(維持管理編)　土木学会」

どの現象として表面化することが多い．その中でもASRによるひび割れの発生状況は特に特徴的である．

無筋または鉄筋量の少ないコンクリート構造物では，**写真2.1.1(2)-2**に示すように，網の目状または亀甲状のひび割れが見られることが多いが，軸方向鉄筋やPC鋼材によりASRによる膨張が拘束されている鉄筋コンクリートおよびプレストレストコンクリート構造物では，拘束方向に直交する方向のひび割れが発生しにくいため，軸方向鋼材やPC鋼材に沿った方向性のあるひび割れが見られることが多い．

また，ASRは構造物の置かれた環境条件（温度，湿度，日射，水掛かりなど）の影響を大きく受けるため，同一の構造物においても部位や位置によってASRの劣化程度が大きく異なることもある．

ASRにより劣化したコンクリートは，圧縮強度や静弾性係数の低下が見られることが多い．特に，圧縮強度と比較して静弾性係数の低下が顕著であり，より鋭敏に現れることが知られている．また，鉄筋とコンクリートとの付着力の低下も懸念される．さらに近年, ASRによるコンクリートの膨張によって，鉄筋コンクリート構造物中の鉄筋の曲げ加工部や圧接部での鉄筋破断事例が複数報告されている．鉄筋破断が確認されているのは，大部分が橋梁構造物であり，橋脚のはり部やフーチングなどでの事例が報告されている．

鉄筋破断した構造物のひび割れ状況の例を**写真2.1.1(2)-3**，鉄筋破断の状況の例を**写真2.1.1(2)-4**に示す．



写真 2.1.1(2)-2　ASR による亀甲状ひび割れ発生状況
出典：「コンクリート構造物の劣化および補修事例集
(社)日本コンクリート工学協会」



写真 2.1.1(2)-3　鉄筋破断した構造物のひび割れの例
出典：「アルカリ骨材反応による鉄筋破断が生じた構造物の安全性評価（中間報告）　土木学会」



写真 2.1.1(2)-4　破断した鉄筋の例
出典：「アルカリ骨材反応による鉄筋破断が生じた構造物の
安全性評価（中間報告）　土木学会」

(3) 疲労

疲労とは，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，主にコンクリートに疲労を生じ，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いが，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．また，水中（湿潤）下におけるコンクリートでは，水分子がマイクロクラックにくさびのように入り込んでいくため，気中と比べて，疲労が促進される．

橋梁構造物において，疲労は床版とはり部材に発生するが，道路橋においては，その大半が床版におけるものであり，疲労の進行に伴ってひび割れが増加し，最終的は陥没にいたる．

床版の疲労の主原因は，大量の大型車両の走行にあるが，**表 2.1.1(3)-1** に示す要因が複合することにより，劣化の進行が早まると考えられる．特に，昭和 30 年から 50 年の高度経済成長期にかけて建設されたものの損傷が大きい．

疲労の劣化要因，劣化現象および劣化指標の関連を**表 2.1.1(3)-2** に示す．

道路橋床版の疲労の事例を**写真 2.1.1(3)－1** に，劣化過程に応じて示す（劣化過程の詳細については，後述の **2.1.2(3)**で説明）．

写真(a)は，最初の段階に見られる一方向のひび割れである（潜伏期）．

写真(b)は，疲労が進行した際に見られる二方向のひび割れである（進展期）．

写真(c)は，更に疲労が進行し，ひび割れが網細化状に進展した状態である（加速期）．

写真(d)は，最終的に床版が陥没した状態である（劣化期）．

表 2.1.1(3)-1　陥没に至った道路橋の鉄筋コンクリート床版における疲労劣化の要因

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鉄筋コンクリート床版は，床版厚が 180 ㎜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．
	主桁拘束の影響	鉄筋コンクリート床版は，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鉄筋コンクリート床版は，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砕石へ移行した時期に一致し，ワーカビリティー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，鉄筋コンクリート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，更に疲労が促進された．

出典：「2001 年制定　コンクリート標準示方書（維持管理編）　土木学会」

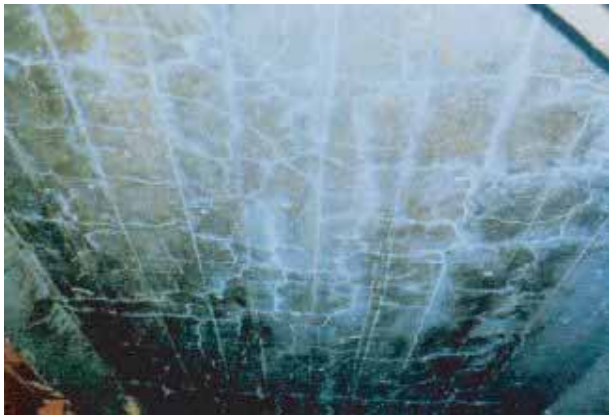
表 2.1.1(3)-2　疲労の劣化機構と要因，指標，現象の関連

劣化機構	劣化要因	劣化現象	劣化指標
床版の疲労	大型車通行量（床版諸元）	道路橋の鉄筋コンクリート床版が輪荷重の繰返し作用によりひび割れや陥没を生じる現象．	ひび割れ密度 たわみ
はり部材の疲労	繰返し荷重	鉄道橋梁などにおいて，荷重の繰返しによって，引張鋼材に亀裂が生じて，それが破断に至る劣化現象．	累積損傷度 鋼材の亀裂長

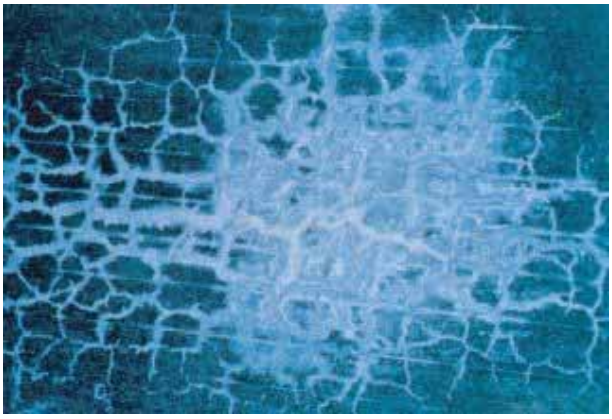
出典：「2001 年制定　コンクリート標準示方書（維持管理編）　土木学会」



(a)　一方向ひび割れ



(b)　二方向ひび割れ



(c)　ひび割れの網細化



(d)　床版の陥没

写真 2.1.1(3)-1　疲労による劣化事例

出典：「コンクリート構造物の劣化事例写真集　(社)日本コンクリート工学協会」

(4)　中性化

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細孔溶液中のｐＨが低下する現象である．

また，コンクリートの中性化とそれに伴う構造物の劣化は，一般的に以下のようなメカニズムで進行すると考えられている．

1) 細孔中の水分が逸散した空隙に，空気が侵入する．
2) 細孔内に侵入した空気中の二酸化炭素が細孔溶液中に溶解し，炭酸イオン（炭酸水素イオン）となる．
3) 炭酸イオンと水酸化カルシウムイオンから供給されるカルシウムイオンが反応し，炭酸カルシウムが生成する．また，他の水和物や未水和セメントも炭酸化する．
4) 炭酸化により，細孔溶液のｐＨ低下および細孔構造
の変化が起きる．
5) ｐＨの低下に伴い，鋼材表面の不動態被膜が消失し，水分と酸素の供給により鋼材の腐食が生じる．
6) 鋼材腐食が進行すると，その体積膨張によりコンクリートにひび割れが生じる．ひび割れが生じる腐食量は，コンクリートの強度，かぶりコンクリート，鉄筋径等により異なる．
7) ひび割れを通して酸素や水分等の供給量が増加し，更なる鋼材腐食の進展により，ひび割れの拡大やかぶりコンクリートのはく離が生じる．また，鋼材の断面欠損により耐荷力の低下等が生じる．

二酸化炭素が侵入したコンクリート内部ではセメント水和物の種々の炭酸化反応が生じているが，細孔溶液中の pH に関係する，セメント水和物の炭酸

表 2.1.1(4)-1　中性化の劣化機構と要因，指標，現象の関連

劣化機構	劣化要因	劣化現象	劣化指標
中性化	二酸化炭素	二酸化炭素がセメント水和物と炭酸化反応を起こし，細孔溶液中の pH を低下させることで，鋼材の腐食が促進され，コンクリートのひび割れやはく離，鋼材の断面減少を引き起こす劣化現象.	中性化深さ 鋼材腐食量

出典：「2001 年制定　コンクリート標準示方書（維持管理編）　土木学会」

化反応は以下の式で示される.

$$Ca(OH)_2 + H_2CO_3 \rightarrow CaCO_3 + 2H_2O$$

（**式 2.1.1－1**）

なお，中性化は，メカニズムの 3)，4)に示すように水和物の変質と細孔構造の変化を伴うため，鋼材の腐食だけでなくコンクリートの強度変化や収縮現象などを引き起こす可能性もある.

劣化要因と劣化現象，劣化指標の関連を**表 2.1.1(4)-1** に示す.

また，中性化による外観劣化の事例を**写真 2.1.1(4)-1～3** に示す.（本報告書は橋梁構造物が対象であるが，一般の建築物の事例も併せて示している.）

写真 2.1.1(4)-1 は, 道路高架橋の壁高欄が中性化によって鉄筋が腐食し，かぶり部分がはく落した事例である.

写真 2.1.1(4)-2 は，建設後約 10 年経過した建物であり，かぶりが 20mm 程度ある部分で，中性化による鉄筋腐食により，はく離ならびに鉄筋方向の大きなひび割れが生じた事例である.

写真 2.1.1(4)-3 は, 建設後 30 年経過した水門(現在は使用されていない）の高欄が，中性化によってかぶり部分がはく離して鉄筋が露出した事例である.



写真 2.1.1(4)-1　道路橋壁高欄の事例

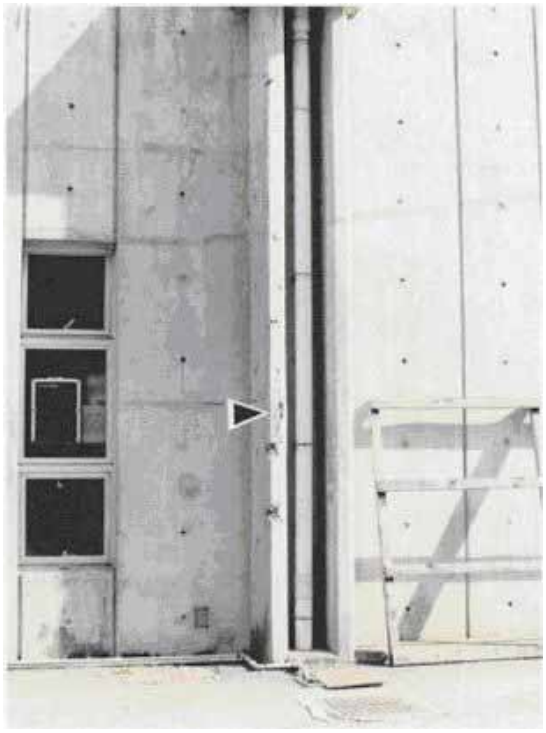




写真 2.1.1(4)－2　建築物の外壁の事例



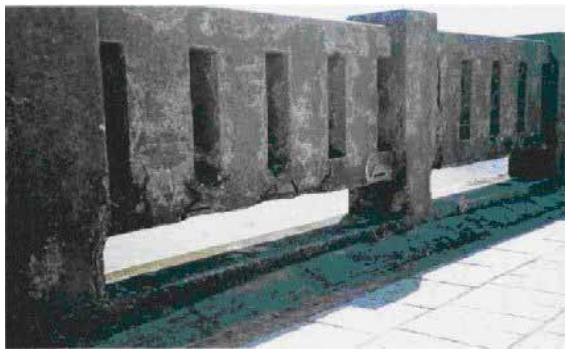


写真 2.1.1(4)-3　水門高欄の事例

(5)　凍害

凍害とは，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．これに対し，何らかの原因で打設後の養生に不具合を生じ，コンクリートがまだ硬化しない内にコンクリート中の水分が凍結し所定の品質を得られない場合を初期凍害と呼び区別している．

水が氷になるときに９％程度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．コンクリート中の水分は，温度降下に伴い凍結していく．その過程で，コンクリート中の空隙が凍結した水により閉塞される．そうして徐々に行場を失った水が凍結時の膨張を拘束されることにより，ついには大きい静水圧がコンクリート内部で作用し，これが引張強度に達したときにひび割れが生じる．この繰返しによりコンクリート表面から徐々に劣化していくことになる．

凍害による劣化の程度は，コンクリートの配合，骨材の品質などのコンクリートに関する要因，部材の断面形状，鋼材量などの構造体に関する要因，および水の供給程度, 日射の影響, 外気温(最低温度), 凍結融解回数などの構造物が供用される環境条件に関するものなど多くの要因によって決まることが知られている. 凍害に影響する主な要因を下記に示す. また，劣化機構と要因，現象，指標との関連を**表 2.1.1(5)-1** にまとめた.

1) コンクリートの品質要因
・セメント，骨材，細骨材なとの種類やその品質.
・単位セメント量，水セメント比，空気量等の配合によって左右されるコンクリートの品質.
・コンクリートの打込み，締め固め，養生方法およびその期間などが影響する施工品質.

2) 環境要因

環境要因とは，コンクリート構造物が建設された場所における気象などの環境条件のことで，最低気

表 2.1.1(5)-1　凍害の劣化機構と要因，指標，現象の関

劣化機構	劣化要因	劣化現象	劣化指標
凍害	凍結融解作用	コンクリート中の水分が凍結と融解を繰返すことによって，コンクリート表面からスケーリング，微細ひび割れおよびポップアウトなどの形で劣化する現象.	凍害深さ 鋼材腐食量

出典：「2001 年制定　コンクリート標準示方書（維持管理編）　土木学会」

温，日射，凍結融解繰返し回数などがある．

図 2.1.1(5)-1 に地域別における凍害危険度を示す．

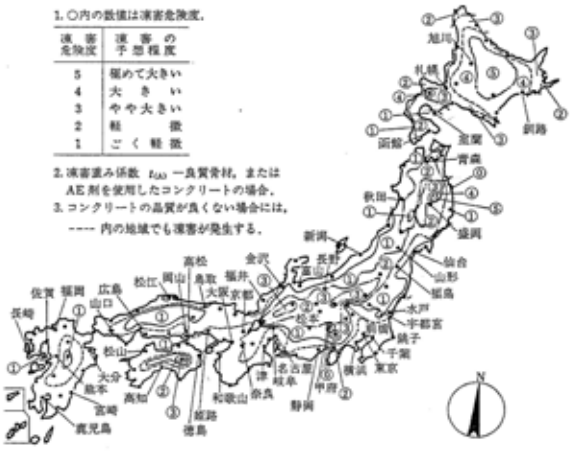


図 2.1.1(5)-1　凍害危険度の分布図

出典：「コンクリート診断技術'03（基礎編）
(社)日本コンクリート工学

3) 水の供給要因

水の供給要因には，水の供給源や供給形態がある．また，これらは水の供給程度にも影響を及ぼす．

供給源：雨，雪，川水，海水，湧水等

供給形態：水の供給を直接受ける場合．
コンクリート表面を伝わってくる場合．
ひび割れなどの欠陥部を経由してくる場合．
飛来によって供給される場合等．

4) その他の要因

その他の要因として，塩害，中性化およびアルカリ骨材反応などの他の劣化要因と複合し，促進されることもある．

以上これらの要因は，各々が影響し合って凍害を発生させる場合が殆どである．例えば，コンクリートの品質が良好でない場合でも，環境が穏やかであったり，水の供給が皆無であれば凍害の程度は小さいし，コンクリートに品質上問題あり，過酷な環境下で十分な水の供給がある場合などは，著しい凍害を起こすことになる．

凍害による典型的な外環劣化事例を**写真 2.1.1(5)-1～3** に示す．**写真 2.1.1(5)-1** は微細ひび割れの発生状況である．コンクリートの凍害は，初期にはびび割れとして観測され，亀甲状のパターンひび割れでエフロレッセンスを伴っていることが多い．**写真 2.1.1(5)-2** はポップアウトの発生状況である．ポップアウトとは，多孔質で吸水率の高い粗骨材（軟石）が，骨材中の水分の凍結によって膨張し，骨材表面のモルタル層をはく離させる現象である．

写真 2.1.1(5)-3 はスケーリングの発生状況である．スケーリングでは，コンクリートのペースト部分が劣化するため，粗骨材が洗い出されるような状態になる．適切な空気泡が連行されていない場合などにみられる．



写真 2.1.1(5)-1　微細ひび割れ



写真 2.1.1(5)-2　ポップアウト



写真 2.1.1(5)-3　スケーリング（はく落）

出典:　「コンクリート診断技術'03（応用編）
(社)日本コンクリート工学協会」

(6) 化学的侵食

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．

橋梁構造物における化学的侵食は，温泉水や酸性河川などの限られた条件下での劣化が想定される．

コンクリートの化学的侵食の原因とメカニズムを以下に示す．

1) 酸による化学的侵食

コンクリートを構成するカルシウム化合物は，酸の作用によって分解し，コンクリートが溶解する．

2) アルカリによる化学的侵食

コンクリート自身が強アルカリであるため，アルカリに対しての抵抗力はかなり大きい．しかし，非常に濃度の高い水酸化ナトリウムには侵食される．

3) 塩類による化学的侵食

塩類による化学的侵食の代表的なものは，硫酸塩による化学的侵食である．硫酸塩がセメント中の水酸化カルシウムと反応して二水セッコウを生成し，さらにエトリンガイトを生成して著しい膨張を引き起こし，コンクリートが割れる。

4) 油類による化学的侵食

一般に, 鉱物油は酸性物質を含まないためコンクリートをほとんど侵食しないが，一部の動植物油には多くの遊離脂肪酸が含まれており，酸として作用してコンクリートが溶解する場合がある．

5) 腐食性ガスによる化学的侵食

コンクリートを侵食するガスとしては, 塩化水素，ふっ化水素，硫化水素，二酸化イオウなどがある．塩化水素やふっ化水素，二酸化イオウは，水に溶けて酸を生成することによりコンクリートを侵食する．

硫化水素はバクテリアの作用等によって硫酸に変化する場合と，セメント硬化体中の水酸化カルシウムと反応して水溶性の塩を生成しコンクリートを侵食する場合とがある．

劣化要因と劣化現象，劣化指標の関連を，**表 2.1.1(6)-1** に示す．

化学的侵食による劣化では，一般にコンクリート表面が侵され，多くは鉄筋位置にひび割れが生じ，一部コンクリート表面がはく落することもある．露出した鉄筋の腐食は激しい．

典型的な外観劣化パターンの写真を図 2.1.1-1 に示す．（本報告書は橋梁構造物が対象であるが、橋梁構造物における化学的侵食による劣化事例は多くはないので，し尿処理場や下水処理場での例を参考に挙げている．）

写真(a)は，擁壁の排出孔付近が温泉水（酸性泉）に含まれる化学成分により劣化した事例である．

写真(b)は，高温(80℃)の硫黄泉によって硫化水素が発生し，覆工コンクリートの表面が劣化した事例である．

写真(c)は，上水の塩素滅菌する水槽で天井の鉄筋が著しく腐食した事例である．

写真(d)は，下水から発生した硫化水素が水分と結合し，バクテリアにより酸化されて硫酸に変化し，コンクリートを劣化させた事例である．かぶり部分のコンクリートは脆弱化して欠落し，鉄筋の腐食が認められた．

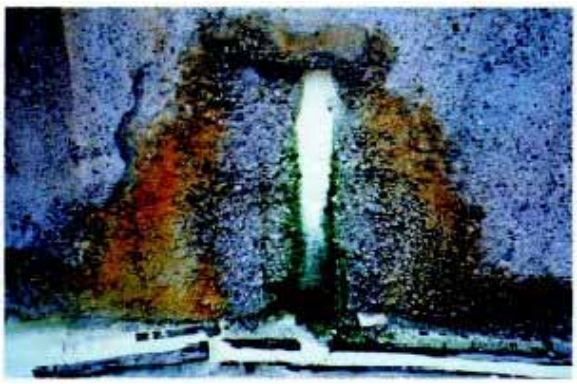
写真(e)は，し尿から発生した硫化水素が水分と結合し，バクテリアにより酸化されて硫酸に変化し，保護塗装とコンクリート表層部部分が脆弱化して欠落した事例である．劣化はまだ表層のみであるが，内部鉄筋の錆汁が表面へしみ出ていた．

写真(f)は，下水道人孔内のコンクリートがはく落して鉄筋腐食が生じた事例である．スラブ下面の鉄筋は著しく腐食しており，垂れ下がっているもの，破断しているものがあった．

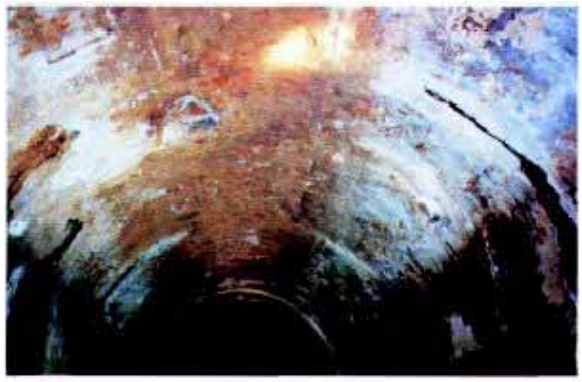
表 2.1.1(6)-1　化学的侵食の劣化機構と要因，指標，現象の関連

劣化機構	劣化要因	劣化現象	劣化指標
化学的侵食	酸性物質 硫酸イオン	酸性物質や硫酸イオンとの接触によりコンクリート硬化体が分解したり，化合物生成時の膨張圧によってコンクリートが劣化する現象.	劣化因子の浸透深さ 中性化深さ 鋼材腐食量

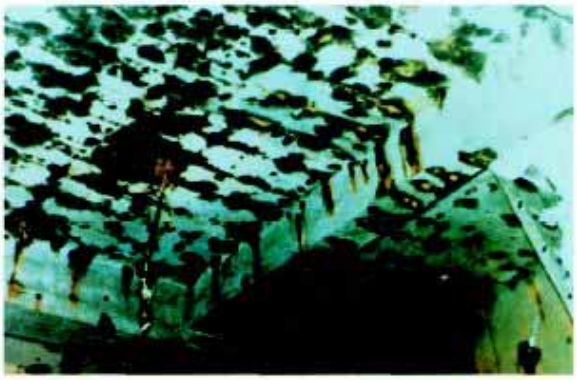
出典：「2001 年制定　コンクリート標準示方書（維持管理編）　土木学会」



(a)　酸・塩類の作用(温泉水)



(b)　酸・塩類の作用(温泉水)



(c)　酸・塩類の作用（塩酸）



(d)　酸・塩類の作用(硫酸)



(e)　酸・塩類の作用(硫酸)



(f)　酸・塩類の作用(硫酸)

図 2.1.1(6)-1　化学的侵食による劣化事例

出典：「コンクリート診断技術'03（基礎編）　(社)日本コンクリート工学協会」

2.1.2　劣化過程と対応策

(1)　塩害

塩害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．

鋼材の腐食調査では，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．

また，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．

なお，鋼材腐食の詳細な調査が行えない場合，構造物の外観調査によるグレード分けから，鉄筋腐食の程度を推測してもよい．

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．塩害によって性能低下が生じた構造物の外観上のグレードを**表 2.1.2(1)-1** に示す．

構造物の性能を定量的に評価し，把握することは重要であり，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．グレーディング評価による性能低下の例を**表 2.1.2(1)-2** に示す．

塩害による構造物の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，**表 2.1.2(1)-3** に示す基準に従うことを標準とする．

表 2.1.2(1)-1　塩害による構造物の外観上のグレードと劣化の状態

構造物の外観上のグレード	劣化の状態
状態Ⅰ－1(潜伏期)	外観上の変化が見られない，腐食発生限界塩化物イオン濃度以下
状態Ⅰ－2(進展期)	外観上の変化が見られない，腐食発生限界塩化物イオン濃度以上，腐食が開始
状態Ⅱ－1(加速期前期)	腐食ひび割れが発生，錆汁が見られる．
状態Ⅱ－2(加速期後期)	腐食ひび割れが多数発生，錆汁が見られる，部分的なはく離・はく落が見られる，腐食量の増大．
状態Ⅲ(劣化期)	腐食ひび割れが多数発生，ひび割れ幅が大きい，錆汁が見られる，はく離・はく落が見られる，変位・たわみが大きい．

出典：「2001 年制定　コンクリート標準示方書(維持管理編)　土木学会」

表 2.1.2(1)-2　塩害による構造物の外観上のグレードと標準的な性能低下

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－1(潜伏期)	－	－	
状態Ⅰ－2(進展期)	－	－	
状態Ⅱ－1(加速期前期)	－	－	美観の低下 ・ひび割れ ・錆汁 ・鋼材の露出 第三者への影響 ・はく離 ・はく落
状態Ⅱ－2(加速期後期)	耐荷力・じん性の低下 ・鋼材断面積の減少 ・破断 ・浮き・はく離によるコンクリート断面の減少	剛性低下(変形の増大・振動の発生) ・鋼材断面積の減少 ・鋼材とコンクリートの付着力の低下 ・浮き・はく離によるコンクリート断面の減少	
状態Ⅲ(劣化期)			

出典：「2001 年制定　コンクリート標準示方書(維持管理編)　土木学会」

表 2.1.2(1)-3　塩害による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
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

出典：「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)　アルカリ骨材反応

ASR によるコンクリートの劣化は，骨材周囲にアルカリシリカゲルが生成する化学的過程と，アルカリシリカゲルの吸水膨張の物理的過程とからなる．ASR による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．ASR によるコンクリートの膨張に着目してモデル化すると，**図 2.1.2(2)-1** に示すように表現される．また，膨張過程，膨張量およびひび割れ進展を考慮した ASR による劣化過程の定義および期間を決定する要因は，**表 2.1.2(2)-1** のように考えられる．潜伏期は主にアルカリシリカゲルが生成される過程であり，ゲルの生成速度が期間決定の要因となる．進展期，加速期および劣化期はアルカリシリカゲルの吸水膨張によりコンクリートの異常膨張，ひび割れの進展などが進行する過程であるため，ゲルの吸水膨張速度が各過程の期間決定の要因となる．

ASR による構造物の劣化過程が潜伏期，進展期，加速期，劣化期のどの時期にあるのかを評価，判定する際，外観の変状は評価のための有力な情報となる．ASR によって性能低下が生じた構造物の外観上のグレードを**表 2.1.2-2** に示す．潜伏期ではアルカリシリカゲルが生成しているものの，膨張が生じていないため，外観上の変状はまだ見られない．進展期に入るとアルカリシリカゲルの膨張が進行し始め，それに伴ってひび割れやゲルの滲出も見られるようになる．加速期で膨張はピークを迎え，ひび割れの本数，幅，密度が進展する．劣化期になると膨張性自体は収束に向かうが，ひび割れが大きく進展し，鋼材の腐食，破断などが見られ，構造物の耐荷性能の大幅な低下が懸念される．

また，コンクリートの膨張量は進展期以降の劣化過程における指標となることから，コアの促進養生試験による残存膨張量測定により今後のコンクリートの膨張量を予測することは，構造物の劣化過程の評価あるいは劣化予測に対して有効である．また，残存膨張量測定のほかに，コンクリートの品質評価試験，構造物のひび割れ進展状況調査などの詳細調査を併せて実施することも重要である．

構造物の性能低下を定量的に評価することは，性能照査型設計体系における性能評価手法として理想であるが，現状では必ずしもそ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，**表 2.1.2(2)-3** を参考にして ASR による構造物の性能低下を半定量的に評価することも提案されている．

ASR による構造物の性能低下で対策が必要と判定された場合には，要求性能を満足するような対策を選定する必要がある．ASR により劣化した構造物の外観上のグレードに応じた対策の選定指標として，一般的に**表 2.1.2(2)-4** に示す基準が提案されている．本報告書では，できる限りの定量的な評価に基づく判定を行うとともに，さらに構造物の劣化グレードの評価を併せて，より適切な現有性能の評価を行うことを標準とする．

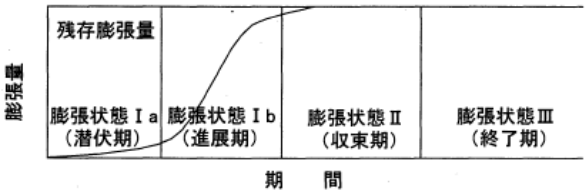


図 2.1.2(2)-1　ASR によるコンクリートの膨張過程

出典：「2001 年制定　コンクリート標準示方書（維持管理編）　土木学会」

表 2.1.2(2)-1　ASR の各劣化過程の定義および期間を決定する要因

劣化過程	定　　義	期間を決定する要因
潜伏期	ASR そのものは進行するものの膨張およびそれに伴うひび割れがまだ発生しない	ASR ゲルの生成速度 （反応性鉱物の種類とその量，アルカリ量）
進展期	水分とアルカリの供給下において膨張が継続的に進行し，ひび割れが発生する	ASR ゲルの吸水膨張速度 （水分とアルカリの供給）
加速期	ASR による膨張が顕著に表れ，膨張速度が最大を示す段階で，ひび割れが進展する	ASR ゲルの吸水膨張速度 （水分とアルカリの供給）
劣化期	ひび割れの幅および密度が増大し，鋼材腐食が進行するとともに，過大な膨張が発生した時には，鋼材の降伏や破断が発生し，部材として耐荷力に影響を及ぼす	ASR ゲルの吸水膨張速度 （水分とアルカリの供給） 鋼材の腐食速度 鋼材の引張応力度増加率

出典：「2001 年制定　コンクリート標準示方書（維持管理編）　土木学会」

表2.1.2(2)-2　ASRによる構造物の外観上のグレードと劣化の状態

構造物の外観上のグレード	劣化の状態
Ⅰ（潜伏期）	ASR は発生しているが，外観上の変状が見られない．
Ⅱ（進展期）	ASR による膨脹によってひび割れが発生し，変色，ゲルの滲出が見られる．
Ⅲ（加速期）	ASR によるひび割れが進展し，ひび割れの本数，幅および密度が増大する．
Ⅳ（劣化期）	ASR によるひび割れが多数発生し，構造物に段差，ずれなどが見られる．かぶりの部分的なはく離・はく落が発生する．鋼材腐食が進行し，錆汁が見られる．変位・変形が大きい．

出典：「2001 年制定　コンクリート標準示方書（維持管理編）　土木学会」

表2.1.2(2)-3　ASRによる構造物の外観上のグレードと標準的な性能低下

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）	—	水密性などの低下 ・ひび割れ 鋼材の腐食発生 ・ひび割れ 構造物の変位・変形 ・たわみ ・ずれ ・段差	美観の低下 ・ひび割れ ・変色 ・ゲルの滲出 第三者への影響 ・はく離 ・はく落
状態Ⅲ（加速期）	じん性の低下 ・鋼材の腐食 耐荷力の低下 本来の照査：耐荷力 簡易な照査：コンクリートの強度低下，鋼材の付着力低下，鋼材の降伏および破断		
状態Ⅳ（劣化期）			

出典：「2001 年制定　コンクリート標準示方書（維持管理編）　土木学会」

表 2.1.2(2)-4　ASR による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
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

出典：「2001 年制定　コンクリート標準示方書（維持管理編）　土木学会」

(3) 疲労

鉄筋コンクリート床版の疲労の劣化過程は，**表 2.1.2(3)-1** および**図 2.1.2(3)-1** に示すひび割れの進行状況に応じて，潜伏期，進展期，加速期，劣化期に別けられる．

疲労により性能低下した床版は，**表 2.1.2(3)-2** に示すように，それぞれの劣化時期において，影響を受ける性能と，その低下の度合いが異なってくるため，対象構造物が潜伏期，進展期，加速期，劣化期のいずれかにあるかを十分に留意して，影響を受ける性能を評価し，対策を選定する必要がある．

疲労により性能低下し，対策が必要と判断された場合には，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．しかし，性能低下を定量的に評価することは困難であり，性能照査に基づいた対策が難しい場合には，**表 2.1.2(3)-3** を基準として対策を選定する．

潜伏期においては，点検を強化するのみで，対策は特に必要ないと考えられるが，雨水の浸透は，疲労を著しく助長するため，床版の防水層が劣化している場合は補修を行うことが望ましい．

進展期においては，床版防水などの補修を行うと共に，予防的に，鋼板接着などの補強をあらかじめ実施することが望ましい．

加速期においては，床版の耐力が低下していくため，鋼板接着や増厚などの補強を中心に実施することが望ましい．

劣化期においも，加速期同様に補強を中心とした対策が必要であるが，対応年数や今後も交通量が増加すると予想される場合，耐久性に優れる剛性床版等に取替えたほうが，費用対効果やライフサイクルコストの面で優れる場合がある．

表 2.1.2(3)-1　鉄筋コンクリート床版の劣化過程の定義

劣化過程	定　　義	劣化進行に影響する要因
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．	適用した設計基準 床版厚，配力鉄筋量 床版支間長 施工 乾燥収縮 使用条件 交通量，車両重量 走行位置
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．	上記に加えて 環境条件 浸透水の影響 実施してきた対策 床版防水工の有無 補修・補強の有無
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はり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．	上記すべて

出典：「2001 年制定　コンクリート標準示方書（維持管理編）　土木学会」



図 2.1.2(3)-1　疲労による鉄筋コンクリート床版下面のひび割れ進行

出典：「2001 年制定　コンクリート標準示方書（維持管理編）　土木学会」

表 2.1.2(3)-2　疲労による構造物の外観上のグレードと標準的な性能低下

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 ・コンクリート表面の陥没 第三者への影響 ・はく離 ・はく落
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	

出典：「2001 年制定　コンクリート標準示方書（維持管理編）　土木学会」

表 2.1.2(3)-3　疲労による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	打替え・取替
Ⅰ（潜伏期）	○	(○)				(○)		
Ⅱ（進展期）	◎	◎	(○)			(○)		
Ⅲ（加速期）	◎	○	◎	○		(○)		
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

出典：「2001 年制定　コンクリート標準示方書（維持管理編）　土木学会」

(4)中性化

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．

また，簡便な方法として，鋼材の腐食状態を**表 2.1.2(4)-1** に示すようにグレード分けして評価を行う方法がある．なお，**表 2.1.2(4)-1** に示す腐食グレードⅠ，Ⅱ，Ⅲ，Ⅳは，それぞれ**表 2.1.2(4)-2** に示す構造物の状態Ⅰ－1，Ⅰ－2，Ⅱ，Ⅲにおおよそ対応している．

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 2.1.2(4)-2** および**表 2.1.2(4)-3** に示す．なお，**表 2.1.2(4)-2**：土木学会と**表 2.1.2(4)-3**：コンクリート工学協会において表現に差が生じている理由は，両者における劣化過程の定義付けの差によるものである．

表 2.1.2(4)-1　腐食のグレードと鋼材の状態

腐食グレード	鋼材の状態
Ⅰ	黒皮の状態，またはさびは生じているが全体的に薄い緻密なさびであり，コンクリート面にさびが付着していることはない．
Ⅱ	部分的に浮きさびがあるが，小面積の斑点状である．
Ⅲ	断面欠損は目視観察では認められないが，鉄筋の全周または全長にわたって浮きさびが生じている．
Ⅳ	断面欠損が生じている．

出典：「2001 年制定　コンクリート標準示方書（維持管理編）　土木学会」

表 2.1.2(4)-2　中性化による構造物の外観上のグレードと劣化の状態

構造物の外観上のグレード	劣化の状態
状態Ⅰ－1（潜伏期）	外観上の変状が見られない，中性化残りが発錆限界以上
状態Ⅰ－2（進展期）	外観上の変状が見られない，中性化残りが発錆限界未満，腐食が開始
状態Ⅱ－1（加速期前期）	腐食ひび割れが発生
状態Ⅱ－2（加速期後期）	腐食ひび割れが多数発生，錆汁が見られる，部分的なはく離・はく落が見られる，腐食量の増大
状態Ⅲ（劣化期）	腐食ひび割れが多数発生，ひび割れ幅が大きい，錆汁が見られる，はく離・はく落が見られる

出典：「2001 年制定　コンクリート標準示方書（維持管理編）　土木学会」

表 2.1.2(4)-3　中性化による構造物の外観上のグレードと劣化の状態（屋外の場合）

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。	中性化深さがの鉄筋位置まで半分以上到達している。

出典：「コンクリート診断技術'05（基礎編）　(社)日本コンクリート工学協会」

（土木学会の場合）

潜伏期：鋼材の中性化深さが鋼材の発生限界に達するまでの期間

進展期：鋼材の腐食開始から腐食ひび割れ発生までの期間（ひび割れは発生していない）

加速期：腐食ひび割れ発生により鋼材の腐食速度が増
大する期間（加速期の前期，後期については，鋼材の腐食量によって区分）

劣化期：鋼材の腐食量の増加により耐荷力の低下が顕著な期間

（コンクリート工学協会の場合）

潜伏期：鉄筋の腐食が開始するまでの期間

進展期：鉄筋の腐食開始から少数の鉄筋が腐食し始めるまでの期間

加速期：多数の鉄筋が腐食し，腐食速度が大幅に加速する期間

劣化期：鉄筋の断面減少などが起こる期間

構造物の諸性能を定量的に評価することは，性能照査型設計体系における性能評価手法として理想的であるが，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，**表 2.1.2(4)-4** を参考に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．

中性化による構造物の性能低下で対策が必要と判定された場合には，要求性能を満足するような対策を選定する必要がある．本報告書では，できる限りの定量的な評価に基づく判定を行うとともに，さらに構造物の劣化状態のグレーディングによる**表 2.1.2(4)-5** に示す基準を併用することにより，より適切な性能評価を行うことを標準とする．

表 2.1.2(4)-4　中性化による構造物の外観上のグレードと標準的な性能低下

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－1（潜伏期）	－	－	－
状態Ⅰ－2（進展期）	－	－	－
状態Ⅱ－1（加速期前期）	－	－	美観の低下 ・ひび割れ ・錆汁 ・鋼材の露出 第三者への影響 ・はく離 ・はく落
状態Ⅱ－2（加速期後期）	－	剛性低下（変形の増大・振動の発生） ・鋼材断面積の減少 ・鋼材とコンクリートの付着力の低下 ・浮き・はく離によるコンクリート断面の減少	
状態Ⅲ（劣化期）	耐荷力・じん性の低下 ・鋼材断面積の減少 ・浮き・はく離によるコンクリート断面の減少		

出典：「2001 年制定　コンクリート標準示方書（維持管理編）　土木学会」

表 2.1.2(4)-5　中性化による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－1（潜伏期）	○	(○)						
Ⅰ－2（進展期）	○	○						
Ⅱ－1（加速期前期）	◎	◎		◎				
Ⅱ－2（加速期後期）	◎	◎	◎	◎	◎	○	○	
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

出典：「2001 年制定　コンクリート標準示方書（維持管理編）　土木学会」

(5)　凍害

凍害は，コンクリート中の水分の凍結膨張に起因することから，劣化現象としてコンクリート断面の減少を伴うことが特徴として挙げられる．その劣化程度によってコンクリート中の鋼材腐食を伴う場合もある．したがって，凍害による劣化過程と，コンクリートの凍害深さとの関係を次のように表すことができる．

状態Ⅰ　潜伏期：凍害によるスケーリング等が現れるまでで，期間の長さは骨材の物性やコンクリートの品質および構造物の置かれている環境等に影響を受ける．

状態Ⅱ　進展期：凍害は進行するが鋼材腐食にまでは至らない．期間の長さは，凍結融解回数や凍結水量より影響を受ける．

状態Ⅲ　加速期：凍害深さが鋼材まで達し、鋼材の腐食が進む．期間の長さは，凍結融解回数や凍結水量より影響を受ける．

状態Ⅳ　劣化期：凍害深さが鋼材位置より大きくなり耐荷力に影響を及ぼす．期間の長さは，鋼材の腐食速度と構造物の耐荷力低下等を生じる鋼材の腐食量に至るまで．

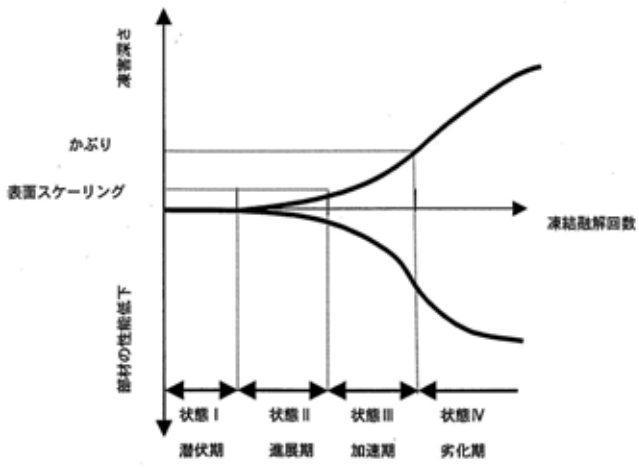


図2.1.2(5)-1　凍害の劣化過程の概念図

出典：「2001 年制定　コンクリート標準示方書（維持管理編）　土木学会」

凍害によるコンクリートの劣化進行深さ（凍害深さ）の増大と構造物の性能低下との関係の概念は，**図2.1.2(5)-1**に示すようにモデル化することができる．また，各劣化過程と期間を決定する要因は，**表 2.1.2(5)-1**のように考えられる．

表2.1.2(5)-1　凍害における各劣化過程の定義と期間を決定する要因

劣化過程	定　　義	期間を決定する要因
潜伏期	凍結融解作用は受けるが劣化が顕在化しない期間	凍害発生の可能性の有無，凍結融解回数
進展期	コンクリート表面の劣化は進行するが，鋼材腐食がない期間	凍害深さ（凍結融解回数，凍結水量）
加速期	コンクリートの劣化が大きくなり，鋼材腐食が増大する期間	凍害深さ，鋼材の腐食速度
劣化期	コンクリートの劣化がかぶり以上になり，耐荷力の低下が顕著になる期間	鋼材の腐食速度

出典：「2001 年制定　コンクリート標準示方書（維持管理編）　土木学会」

現時点の技術レベルでは，凍結毎の最低温度や飽水度などの評価が難しく，それぞれの期間を計算で予測することは困難である．そこで，現実的な方法として，現地における詳細点検などによって得られる，構造物が置かれている環境条件や凍害深さを求め点検後の劣化予測を行う．

コンクリート標準示方書[維持管理編]によると，「凍害による構造物の性能低下はコンクリート断面の減少と鋼材腐食に起因するため，構造物の潜伏期，進展期，加速期，劣化期のいずれか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．また，構造物の点検時および予定供用期間終了時における諸性能の評価は，定量的な性能照査に基づくことが望ましいが，これが困難な場合はグレーティングによる方法を用いても良い．」と示している．また，劣化過程毎に評価の対象となる性能を適切に選定する必要がある．劣化過程と標準的な性能低下の関係を**表2.1.2.(5)-2**　に示す．

表2.1.2.(5)-2　凍害による構造物の外観上のグレードと標準的な性能低下

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)	—	—	美観の低下 ・スケーリング，ポップアウト ・ひび割れ 第三者への影響 ・はく離 ・はく落
状態III (加速期)	—	—	
状態IV (劣化期)	耐荷力の低下 ・コンクリート断面の減少 ・鋼材腐食	変位・変形 ・コンクリート断面の減少 ・鋼材腐食	

出典：「2001 年制定　コンクリート標準示方書（維持管理編）　土木学会」

凍害による構造物の劣化程度の判定は，劣化の概要および劣化している代表的な部分について，ひび割れ，スケーリング，浮き・はく離・はく落，強度（推定），凍害部分の深さおよび鉄筋の腐食などの調査結果を基に行う．劣化の程度を判断するために必要なデータが不足する場合は詳細調査を行う必要がある．凍害の二次診断の劣化度の区分を**表2.1.2(5)-3**に示す．

対策が必要と判断された場合には，要求性能を満足するような対策を選定する必要がある．一般的には，①点検強化，②補修，③補強，④修景，⑤使用性回復，⑥機能性向上，⑦供用制限，⑧解体・撤去

表2.1.2(5)-3　凍害の二次診断の劣化度の区分

劣化過程	劣化度	区分の基準
潜伏期	I （ほとんどなし）	軽微なひび割れ（幅0．2mm以下），または表面のみのスケーリング（ピーリング）で進行性ではない．
進展期	II－1 （軽度）	表面に小さなひび割れ（幅0．3mmぐらいまで），ポップアウト，または中程度までのスケーリング（深さ10mmぐらいまで）．
	II－2 （中度）	ひび割れ幅が大きい（0．3mm以上），または強度のスケーリング，ぜい弱化剥離がある－深さ20mmぐらいまでの劣化．
加速期	III （やや重度）	鉄筋付近までのひび割れ，浮き，剥落，ぜい弱化や激しいスケーリング深さ30mmぐらいまでの劣化．
劣化期	IV （重度）	コンクリートが浮き上がり，剥離も著しく，ぜい弱部も深い（30mm以上）．鉄筋も断面欠損を生じている．

出典　「コンクリート診断技術'03（基礎編）　(社)日本コンクリート工学協会」

表 2.1.2.(5)-4　凍害による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）	○	◎	◎	○	○	○	○	◎

◎：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

出典：「2001 年制定　コンクリート標準示方書（維持管理編）　土木学会」

のいずれかを選択することとなる．

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方法も採られる．この場合の標準的な目安を**表2.1.2.(5)-4**に示す．

(6)　化学的侵食

化学的侵食は外部からの化学物質によるため，原因となる化学物質の特定が重要となる．構造物の劣化状態が潜伏期，進展期，加速期，劣化期のいずれであるかを十分に調査して，劣化の影響を受ける構造物の性能を評価しなければならない．

化学的侵食は，一般的にコンクリート表面から劣化が進行することから，表面を観察することによって劣化過程を比較的容易に判断することができる．

なお，化学的侵食では，原因物質の種類・濃度，流水の有無，気温・湿度などで進行の程度が異なるので，一般に劣化予測は難しい．劣化予測式による評価が困難な場合は，**表 2.1.2(6)-1** に示す外観観察によるグレーディングによって評価を行う．

構造物の性能低下を定量的に把握することが理想であるが，現状ではそのような手法が確立していない．一例として，構造物の外観上のグレードと標準的な性能低下の関係を**表 2.1.2(6)-2** に示すように評価する方法が提唱されている．

対策が必要と判定された場合には，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．現状では定量的な評価が難しく，**表2.1.2(6)-3**に示す基準に従うことを標準とする．

表2.1.2(6)-1　構造物の外観上のグレードと劣化の状態

構造物の外観上のグレード	劣化の状態
状態Ⅰ（潜伏期前期）	外観上の変状が見られない
状態Ⅱ－1（潜伏期後期）	コンクリート保護層に変状が見られる
状態Ⅱ－2（進展期）	コンクリートに変状が見られる，劣化因子の浸透深さが鋼材位置まで達していない
状態Ⅲ－1（加速期前期）	コンクリートの断面欠損が著しい，劣化因子の浸透深さが鋼材位置に達している，鋼材の腐食が見られる
状態Ⅲ－2（加速期後期）	コンクリートの断面欠損が著しい，鋼材の腐食量の増大
状態Ⅳ（劣化期）	鋼材の腐食が著しい，変位・たわみが大きい

出典：「2001 年制定　コンクリート標準示方書（維持管理編）　土木学会」

表2.1.2(6)-2　構造物の外観上のグレードと標準的な性能低下

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（潜伏期前期）	－	－	－
状態Ⅱ－1（潜伏期後期）	－	－	美観の低下 ・コンクリート保護層のはく離・はく落
状態Ⅱ－2（進展期）	耐荷力の低下 ・コンクリート断面の減少	剛性の低下（変形の増大・振動の発生） ・鋼材とコンクリートの付着力の低下	美観の低下 ・コンクリートの変質・ひび割れ 第三者への影響 ・はく離 ・はく落
状態Ⅲ－1（加速期前期）		剛性の低下（変形の増大・振動の発生） ・コンクリート断面の減少 ・鋼材断面積の減少	美観の低下 ・コンクリートの変質・ひび割れ ・鋼材の露出 ・錆汁
状態Ⅲ－2（加速期後期）	耐荷力・じん性の低下 ・鋼材断面積の減少		
状態Ⅳ（劣化期）			

出典：「2001 年制定　コンクリート標準示方書（維持管理編）　土木学会」

表 2.1.2(6)-3　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（潜伏期前期）	○	(○)						
Ⅱ－1（潜伏期後期）	○	◎		◎				
Ⅱ－2（進展期）	◎	◎	○	◎	○	○		
Ⅲ－1（加速期前期）	◎	◎	◎	◎	◎	○		
Ⅲ－2（加速期後期）	◎	◎	◎	◎	◎	◎	○	
Ⅳ（劣化期）		○	◎	○	◎	◎	◎	◎

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

出典：「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 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，複雑な構造とる．材料的な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．

コンクリートの一般的な劣化機構（塩害，中性化，アルカリ骨材反応，凍害，化学的侵食，疲労）に関するものは，ＲＣ構造物とＰＣ構造物において共通であるため前節**2.1**に従うものとする．ここでは，ＰＣ構造物特有のＰＣ鋼材関連（ＰＣグラウト含む）について述べるものである．

(1) ＰＣ鋼材の腐食要因

ＰＣ鋼材は鉄筋とは異なって，供用状態において高応力が作用している場合が多く，腐食による断面欠損は耐久性はもとより耐荷性能に対しても大きく影響する．ＰＣ鋼材の腐食が原因による橋梁の重大事故は海外でも報告[1)]されている．ＰＣ鋼材の腐食は内部で進行するため，

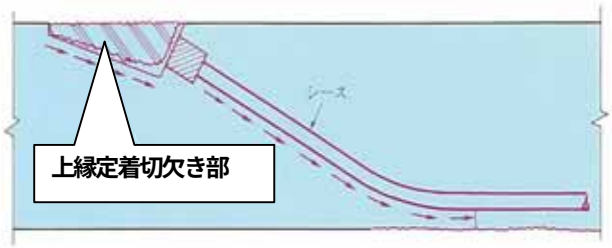


図2.2.1-1　ＰＣＴ桁の上縁定着切欠き部と水の浸入経路

ＰＣ構造物外見上の変状では判断することが不可能な場合もある．

一般に，ＰＣ構造物に使用されるＰＣ鋼材はポストテンション方式の場合はセメント系グラウト，プレテンション方式の場合はコンクリートによって保護されている．グラウトおよびコンクリートの空隙は飽和水酸化カルシウムを主成分とする間隙水でみたされており，その液相のｐＨは１２～１３程度である．この液相に接する鋼材の表面は緻密な不動態皮膜によって保護されるため，鋼材は腐食しないと考えられる．しかし，グラウト充填に不良部が存在したり，コンクリートのひび割れが鋼材部分まで達して，不動態皮膜を形成するｐＨの条件が確保できない状態となると鋼材の腐食は進行する．また，グラウトあるいはコンクリート中へある一定量を超える塩化物イオンが侵入することによって不動態皮膜が破壊される場合も腐食が進行することになる．

塩化物イオンの進入は，一般的な劣化要因による劣化過程で起こるものであるが，最もＰＣ鋼材関連に腐食を引き起こすのは塩害である．海上および海岸線付近，あるいは冬期に凍結防止剤を使用する地域にあるＰＣ構造物は塩害の影響を受け劣化する場合がある．一般的なＰＣ構造物の場合は，コンクリート断面の最外縁に配置されている鋼材は鉄筋でありＰＣ鋼材は鉄筋より内部に位置している．塩害の影響を受ける場合，最初に，鉄筋の腐食にによりひび割れ等の劣化がおこり，塩化物イオン，水分，酸素等の腐食因子の供給が活発化されＰＣ鋼材の腐食を誘発していく．

また，ポストテンション方式の定着部付近から塩化物イオンを含んだ水分が進入しＰＣ鋼材の腐食を誘発することもある．昭和３０年代後半～５０年代に製作されたＰＣポストテンション方式Ｔ桁は適用支間により主桁上フランジ上縁に定着用の切欠き部を設けていた場合がある（**図2.2.1-1**）．その上縁定着切欠き部の後埋めコンクリートの隙間より凍結防止剤による塩化物イオンを大量に含んだ水分が浸入し，シース沿いにＰＣケーブル内部まで浸透し，主桁下フランジから錆汁が漏水した事例も報告されている[2)]．

設計基準強度が高く低水セメント比のコンクリートを使用するＰＣ構造物では中性化速度が遅く中性化自体に

よる劣化は問題とはならないが，他の要因等によるひび割れが弱点となり中性化が進行し鋼材の不動態皮膜が保持できなくなる場合もある．

アルカリ骨材反応，凍害，化学的浸食等もそれらの要因によって引起こされるひび割れ等の劣化がＰＣ鋼材関連の腐食を助長する場合がある．

(2)　ＰＣグラウト不良による影響

ＰＣグラウトは，その品質や施工の良否によりＰＣ構造物の耐久性に大きな影響を与える重要なものである．ＰＣグラウトの目的は次の２つに大別できる．

① ＰＣ鋼材を腐食から保護すること．
② ＰＣ鋼材と部材コンクリートの一体性を確保すること．

ＰＣ鋼材は，外部からの空気，水，あるいはその他の腐食性物質の侵入により腐食する．ＰＣ鋼材の腐食が進行すると，その断面が減少し，破断による耐荷力の急激な低下を引き起こし，構造物に著しい損傷をもたらすことがある．一般的にポストテンション方式の内ケーブルでは，ＰＣ鋼材を緊張したのちＰＣグラウトを充填にすることにより，グラウトのアルカリがＰＣ鋼材の表面に不動態皮膜を形成しＰＣ鋼材を腐食環境から保護する．また，部材コンクリートとＰＣ鋼材とがＰＣグラウト充填により一体性が確保でき，外力等の荷重に対し部材が一体となって変形することで，設計で想定したプレストレストコンクリート橋の耐荷性が確保される．しかし，コンクリートとＰＣ鋼材との付着が不完全であると，付着が完全な場合と比較して，終局耐荷力の低下や，ひび割れが生じた場合には，ひび割れが集中するとともにその幅が大きくなり，構造物の耐久性を損なうことになる．

ＰＣグラウト不良を原因とする損傷事例[3]は少なくはない．ＰＣ構造物においてＰＣグラウト不良は極めて重大な災害を引き起こす原因であり，ＰＣグラウト未充填部への雨水や海水，凍結防止剤を含んだ水の浸入に誘発されて，ＰＣ鋼材は腐食し，さらには破断に至る場合もある．あるいは，シース内に浸入した水分が凍結・融解を繰り返すことにより，コンクリート表面にシースに沿ったひび割れが生じる場合がある（**写真2.2.1−1**）．



写真2.2.1−1　ＰＣＴ桁の側面に発生したひび割れ

ＰＣグラウト不良は，材料，施工方法，品質管理や検査方法に問題がある場合に起こるものである．ＰＣグラウト不良の原因として次のような状況が考えられる。

ⅰ）ＰＣグラウト施工後，グラウトのブリージングにより，定着部付近や上凸形状のシースの上端に空隙となって残る場合
ⅱ）シースの長さ，配置角度とグラウト材料の粘性，および注入圧力との関係で内部空隙が残留する場合
ⅲ）ＰＣグラウト施工が連続して行われず空隙を生じる場合

近年では，グラウト不良による事故を重大に受け止め，各方面・機関においてＰＣグラウトに関する検討[4][5]を進め，改善策を講じている．

(3)　定着部の構造的要因

高張力状態にあるＰＣ鋼材の定着部分においては，定着部と周囲のコンクリートともに応力が集中するために損傷を生じやすい．したがって，定着部周りの補強や跡埋め部の防水処理は耐久性にとって非常に重要なものである．また，定着部付近は構造的に複雑となるため，施工が煩雑となるため十分な留意が必要となる箇所である．

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．ＲＣ構造物では，鉄筋腐食は耐荷力低下を伴う深刻な事態となる場合もあるが，ＰＣ構造物の場合では，鉄筋が腐食してもＰＣ鋼材が健全であればたちまち耐荷力の低下が懸念される状態とはならない．ただし，ＰＣ鋼材の腐食は鉄筋腐食とは異なり，腐食の進行が外観の変状と直接結びついていないため，劣化予測が困難となり，海外の落橋事例[6]に見られる様な重大な事態を引き起こす場合もある．

ＰＣ鋼材の腐食は内部で進行し，その変状が外部に明確に表れるものではないため，ＰＣ鋼材関連の劣化過程をコンクリート標準示方書［維持管理編］[7]に示される４つの劣化過程（潜伏期，進展期，加速期，劣化期）に明確に分類することは難しいと思われる．ここでは，ＰＣ鋼材の腐食劣化過程と外観の劣化を可能な限り関連付けした形で示すが，例外も少なくないことを理解していただきたい．潜伏期では，ＰＣ鋼材の腐食発生限界に達するまでの状態であるため外観上の変状は見られない．進展期では，ＰＣ鋼材が腐食開始～断面減少を開始するまでの状態であり，鉄筋も含め鋼材の腐食によるひび割れが発生し，場合によっては定着部に軽微な損傷が生じる場合もある．加速期では，ＰＣ鋼材に継続的に腐食が発生しＰＣ鋼材断面が減少する状態であり，外観上はＰＣ鋼材およびシースの腐食が進展することによりひび割れの進展・劣化が進む．劣化期では，ＰＣ鋼材が著しく断面減少を生じ，破断にいたる場合がある状態であり，外観の変状は，PC鋼材の損傷・破断に伴いプレストレスが減少することにより，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．劣化期では特に安全性能において耐荷力が問題となる．ＰＣ鋼材腐食に伴う外観変状の特徴は，潜伏期～加速期までの変状と劣化期の変状が著しく異なることである．また，劣化期の変状が急激に現れることは，ＲＣ構造物では見られない特徴である．

表2.2.2-1にＰＣ構造物の外観上のグレードと劣化の状態，また，**表2.2.2-2**にＰＣ構造物の外観上のグレードと標準的な性能低下を示す．ＰＣ構造物の性能低下で対策が必要と判定された場合には，要求性能を満足するような対策を選定する必要がある．ＰＣ構造物の鋼材劣化に伴う外観上のグレードに応じた対策の選定を**表2.2.3-3**に示す．

表2.2.2－1　ＰＣ構造物の外観上のグレードと劣化の状態

構造物の外観上のグレード		劣化の状態	ＰＣ鋼材の劣化状態
状態Ⅰ	潜伏期	外観上の変状がみられない.	ＰＣ鋼材の腐食発生限界に達していない
状態Ⅱ	進展期	鋼材腐食（鉄筋も含め）によるひび割れが発生，定着部に軽微な損傷が生じる.	ＰＣ鋼材に腐食が発生するが断面減少は生じていない
状態Ⅲ	加速期	鋼材腐食によるひび割れが進展し、ひび割れの本数、幅および密度が増大する.	ＰＣ鋼材に腐食が継続的に発生し，断面減少が開始する.
状態Ⅳ	劣化期	鋼材腐食によるひび割れが多数発生し、構造物の変位･変形が大きくなる．かぶりの部分的な剥離･剥落が発生する．鋼材腐食が進行し、錆汁が見られる．鋼材の破断が発生する.	ＰＣ鋼材に著しい断面減少が生じ，場合によっては破断する.

表2.2.2－2　ＰＣ構造物の外観上のグレードと標準的な性能低下

グレード		性能の低下		
		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	－	水密性などの低下 ･ひび割れ 鋼材の腐食発生 ･ひび割れ 構造物の変位･変形 ･たわみの増大 ･ずれ ･段差 ･振動	美観の低下 ･ひび割れ ･変色 ･錆汁 第三者への影響 ･剥離 ･剥落
状態Ⅲ	加速期	じん性の低下 ･鋼材の腐食 耐荷力の低下 ＰＣ鋼材断面積の減少 破断･浮き･剥離によるコンクリート断面の減少 鋼材の付着力低下		
状態Ⅳ	劣化期			

表2.2.2−3　ＰＣ構造物の外観上のグレードと対策

PC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
潜伏期	(○)							
進展期	○	(○)		○				
加速期	◎	◎	○	◎	○	○	(○)	
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

参考文献

1) Iseck, B.;Materials Performance, Vol.21, pp.36, 1982.
2) 中部セメントコンクリート研究会,プレストレストコンクリート建設業協会編：実例でみるＰＣ橋の耐久性向上技術,理工学社,1992.11
3) プレストレスト・コンクリート技術協会：PC橋の耐久性向上のための設計・施工マニュアル，平成９年３月
4) プレストレストコンクリート建設業協会：PCグラウト＆プレグラウトPC鋼材施工マニュアル（改訂版），2002.
5) （社）プレストレストコンクリート技術協会：ＰＣグラウトの設計施工指針，2005.12
6) 日経ＢＰ社：日経コンストラクション，pp.86-91, 1997.1.
7) 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.

2.3 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反応する現象であり，その表面にはエネルギーの大きい部分と小さい部分が存在し，乾燥状態においてはこれらは反応しないが，表面に水分が付着するとエネルギーの移動が始まる．すなわち，表面における水の部分で局部電池ができ，電池の一方の極である陽極（アノード）では，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．一方の極，陰極（カソード）では陽極で生じた電子が消費される反応が生じる．

前述のとおり，鋼材は水と酸素が供給されることにより腐食が進行するが，自然環境下では，例えば雨水には塩分や硫黄酸化物などの腐食性物質が含まれ，この物質の含有量の大小により腐食の速度が異なる．このように鋼材に腐食を生じさせる環境を腐食環境と呼び，日本国内においても，それぞれの地域特性により異なるが，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なる．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，同一の腐食環境下におかれた構造物でも，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．腐食進行を助長する要因が多い箇所，例えば端部の支承周りで構造上滞水が生じやすい箇所では，腐食も進行しやすい，あるいは直射日光が当たる箇所と当たらない箇所では，塗膜の劣化状況が異なり，結果として腐食の進行レベルも異なるなど様々である．

一般的な橋梁において腐食発生の事例が多い部位をまとめると以下のようである．

1)桁端部における腐食（**写真2.3.1-1**）

桁端部に設置される伸縮装置の排水機能が不十分なため，この部位からの雨水の漏水，または鉄筋コンクリート床版端部が損傷し，この部位からの遊離石灰を含んだ雨水の漏水により，桁端部に腐食が生じている．

2)床版損傷部からの漏水による腐食（**写真2.3.1-2**）

床版コンクリートの打継ぎ部やひび割れ発生部からの漏水により鋼桁の腐食が生じている．

3)滞水，土砂の堆積しやすい構造部位における腐食

横構取合部（**写真2.3.1-3**）など部材の格点部は雨水，結露水が集まる部位であり，特にガセットプレートやフランジなどの水平部材では水はけが悪いことか



写真 2.3.1-1　桁端部における腐食

出典：「鋼橋の損傷と点検・診断　(社)日本橋梁建設協会」



写真 2.3.1-2　床版損傷部からの漏水による腐食

出典：「鋼橋の損傷と点検・診断　(社)日本橋梁建設協会」



写真 2.3.1-3　横構取合部の腐食

出典：「鋼橋の損傷と点検・診断　(社)日本橋梁建設協会」

ら腐食が生じやすい．また箱桁内部（**写真2.3.1-4**）も高力ボルト継手部からの雨水の進入あるいは結露により滞水が生じ，腐食が進行する．

4)塗膜の品質が確保しにくい部位における腐食

ボルトなどの突出により形状が複雑な現場継手部（**写真2.3.1-5**）やコバ面などは，塗膜厚の確保が難しい部位であり，一般部に比べて塗膜劣化が生じやすい．

5)ケーブル

ケーブルは直径５～７ミリのケーブル素線を束ねたものであり，ケーブル素線には亜鉛めっきを施し，さらに防食被覆により外界の腐食環境からの遮断を行っているにも関わらず，ケーブル表層に腐食が発生しているのが認められた．海上という腐食環境の厳しい地域であることもあるが，調査研究によって次のような原因が考えられている．

ケーブル内部には工事中あるいは防食被覆後に浸入した滞留水があり，この滞留水がケーブル内部を高湿度化し，温度変化の大きいケーブル表層部で結露による濡れを生じ，亜鉛めっき鋼線の腐食環境を形成したものと考えられる．



写真 2.3.1-4　箱桁内部の腐食

出典：「鋼橋の損傷と点検・診断　(社)日本橋梁建設協会」



写真 2.3.1-5　現場継手部の腐食

出典：「鋼橋の損傷と点検・診断　(社)日本橋梁建設協会」

(2)　亀裂

鋼橋において発生する亀裂損傷は、何らかの要因で高い応力が作用して一度に起こる場合と以下に述べる疲労現象によるものがある．

交通荷重や風荷重のように繰返して外力が作用する場合，その発生する応力が鋼材の静的耐力に比べて相当に小さい場合でも，構造的な応力集中，又は溶接形状や溶接欠陥などに起因する応力集中部から亀裂が発生し，徐々に進展・拡大して最終的には部材の破断に至ることがある．このような繰返し外力により発生する亀裂を疲労亀裂，進展して部材が損傷する現象を疲労損傷という．

疲労現象は対象部材に繰返し作用する応力範囲とその繰返し数の関係で表すことができるが，同じ応力範囲，繰返し数であっても，継手の形状や応力集中率により部材の疲労損傷の状況は異なる．疲労損傷の事例が多い溶接止端部を例にとると，**図2.3.1-1**に示すように，この部分には，設計計算により求められる一般部の応力（公称応力）以外にも，継手全体の力の流れの不連続による構造的な応力集中や溶接止端形状による局部的な応力集中の二次応力が作用することになる．

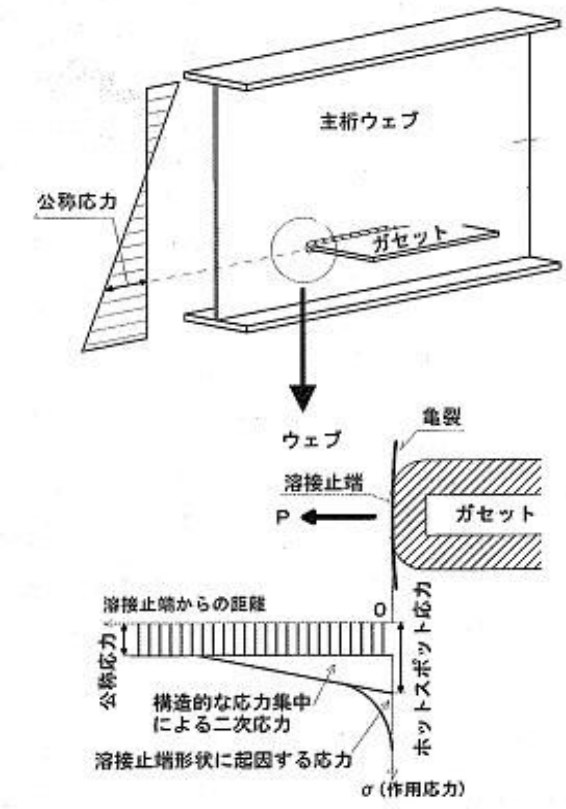


図 2.3.1-1　溶接継手部の応力集中

出典：「土木構造物の点検・診断・対策技術
(社)日本鋼構造協会」

なお疲労亀裂が目視できるよう部材表面に現れるまでには、かなりの時間が費やされる上に鋼構造物の多くは塗装による防食が施されていることもあり，疲労亀裂の発見は困難である．また，その構造や応力の状態，あるいは応力集中の原因によって，部材を破断させるまで進展し続け，脆性的な破壊を引き起こす場合があるので注意が必要である．

一般的な橋梁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（**写真2.3.1-6**）

損傷部は分配横桁あるいは対傾構を主桁に取付ける垂直補剛材溶接部周辺であり，損傷の原因として以下の作用によるものが考えられる．

・横桁（対傾構）の荷重分配作用に伴う二次応力
・輪荷重による床版のたわみに伴う二次応力

2)支承ソールプレート（**写真2.3.1-7**）

亀裂はソールプレート前面の溶接部から発生しているものが多く，損傷原因として以下の影響が考えられる．

・ソールプレート部分の断面急変に伴う応力集中
・支承機能の低下に伴い，桁端の回転および水平移動が拘束されることによる応力の増加

3)アーチ橋の垂直材（**写真2.3.1-8**）

亀裂は，比較的部材長の短い垂直材とアーチリブあるいは補剛桁との接合部材の溶接部から発生しており，損傷の原因として，以下の影響が考えられる．

・設計上ピン結合として設計された付け根部が実際の構造では剛結合に近いため、発生する二次曲げ
・力の伝達がスムーズでない構造ディテール

4)鋼床版（**写真2.3.1-9**）

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，以下のような溶接部から亀裂が発生する．

・縦リブの突合せ溶接
・デッキプレートと縦リブ，横リブの溶接
・デッキプレートと垂直補剛材の溶接
・横リブと縦リブの交差部

5)桁端の切欠き部（**写真2.3.1-10**）

切欠きＲ部の法線方向に高い応力集中が生じるため，この部分のフランジとウェブの溶接部に亀裂が発生している．この損傷は，発生部位が主要部材であり，放置すると重大事故につながる恐れがある．



写真 2.3.1-6　主桁と横桁の接合部の亀裂
出典：「鋼橋の損傷と点検・診断　(社)日本橋梁建設協会」

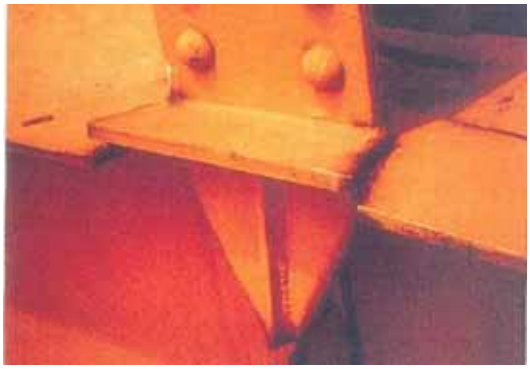


写真 2.3.1-8　アーチ橋の垂直材取付部の亀裂
出典：「鋼橋の損傷と点検・診断　(社)日本橋梁建設協会」



写真 2.3.1-7　支承ソールプレート溶接部付近の亀裂
出典：「鋼橋の損傷と点検・診断　(社)日本橋梁建設協会」

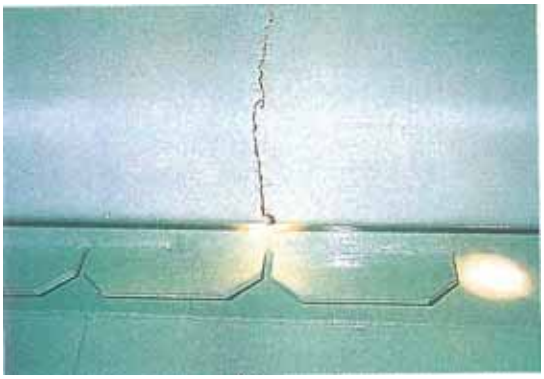


写真 2.3.1-9　縦リブ現場溶接部の亀裂
出典：「鋼橋の損傷と点検・診断　(社)日本橋梁建設協会」



写真 2.3.1-10　桁端切欠き部の亀裂

出典：「鋼橋の損傷と点検・診断　(社)日本橋梁建設協会」

(3)　その他

1)ボルト（**写真2.3.1-11**）

高力ボルト，特にF11T以上の高強度ボルトは，一定の引張荷重が加えられているとき，ある時間経過した後，外見上はほとんど変形することなく，突然脆性的に破壊することがある．このような現象を遅れ破壊と呼んでいる．一般に，主たる原因としては，水素脆性と応力腐食割れが考えられる．

水素脆性は，鋼材中の水素が結晶の粒界やミクロ的な内部亀裂などといった鋼材の不連続部にガス状，分子状あるいはイオン状態で存在し，こうした不連続部から割れが発生するものである．

応力腐食割れは，鋼の表面の材料的な欠陥部で局部電池が形成され，アノード側に生じたピットによって応力集中を受けて割れが発生するものである．



写真 2.3.1-11　ボルトの破断

出典：「鋼橋の損傷と点検・診断　(社)日本橋梁建設協会」

2)全体系の劣化

基礎工，下部工の移動による支点移動や支点沈下に伴い，設計時に想定した以上の応力が発生する場合がある．この現象により，トラス主構，アーチリブなどの軸力部材の座屈変形や主桁フランジなど板部材の面外座屈変形が生じる場合がある．また，桁端部において路面の段差（**写真2.3.1-12**）や遊間異常が発生し，支承や伸縮装置などに想定以上の外力が作用して，変形や亀裂，破断などの損傷が生じる場合がある．



写真 2.3.1-12　伸縮装置での段差

出典：「鋼橋の損傷と点検・診断　(社)日本橋梁建設協会」

2.3.2 劣化過程と対応策

(1) 腐食

1)一般部

塗装した鋼橋の腐食は塗膜の劣化から始まる．鋼橋の塗装には，架橋地点の環境や塗り替えの難易度などによって設定される仕様（グレード）があり，設定された年数毎に塗り替えを行うことが重要であるが，現地の環境が予想していたより厳しいなどの原因で腐食が設定より早く進んでいることもある．このため，数年に１度の塗膜の点検が鋼橋の重要な延命化対策の一つとなる．

表 2.3.2-1 は，鋼道路橋塗装便覧で塗り替え時に行う素地調整（ケレン）のグレードを規定したものに本書で考慮している劣化過程をあてはめて見たものである．

2)桁端部

橋梁の桁端部は，点検，塗り替えなどが困難な場所も存在することから，塗装仕様としては一般的に内面用（永久）塗装が用いられている．しかし，内面用塗装が必ずしも，一般外面の塗装よりも耐久性が高い訳ではない上，桁端付近は，風通しや日照条件などの点で一般部に比べて湿潤状態を保持している時間が長く，塗装に対する環境は悪いことから，一般的には橋梁の中央付近よりも腐食が進んでいることが多い．

また，供用年数が長く交通量が多い場合は，橋梁の継目（伸縮装置）の破損などによる漏水が特に腐食条件を悪化させることが多いため，劣化の程度は一般部と比較して激しい傾向となる．

3)付属物

支承や伸縮装置などは，付属物と分類されることもあるが，橋梁全体を支持していたり，もしくは車両荷重を直接受けていたりと，重要かつ比較的ダメージを受けやすい部材といえる．

どちらも橋梁の規模，形式に応じて数種類のタイプが存在するが，部品毎に腐食の状況も異なると考えられるので注意が必要である．

4)ケーブル

近年，１９世紀に架けられたブルックリン橋をはじめとして，長大橋のケーブルの腐食が社会問題となっている．亜鉛めっきされたケーブルが腐食する原因として，ラッピングされている内部に何らかの要因で侵入した水が湿潤状態を形成するためと考えられている．**図 2.3.2-1** はアメリカのハドソン川に架かる吊り橋のメインケーブルの腐食状況を表したものであり，当初，亜鉛めっき層が白亜状の水酸化物に覆われていき，やがて鉄錆に浸食されていく状況がわかる．

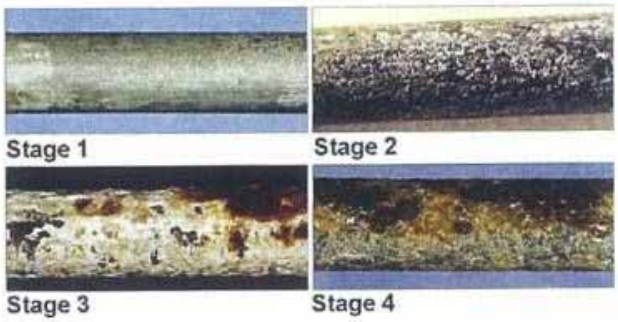


図2.3.2-1　ケーブルの腐食の推移

出典：「FRACTURE ANALYSUS OF THE MID-HUDSON BRIDGE MAIN CABLE WIRE The 4th

表2.3.2-1　鋼橋各部所の腐食による劣化程度

	劣化程度				
	一般部	桁端部	支承（鋼製支承）	伸縮装置	ケーブル
潜在期	さびの発生がほとんど無く塗膜が変色，白亜化した状態	桁端部の主桁が変色している．	さびの発生がほとんど無く塗膜が変色，白亜化した状態．	シール材に損傷，脱落などがある．	素線表面に金属的な光沢は認められるもの，所々に白亜状の腐食が局所的に見受けられる．
進展期	部分的に点さびおよび塗膜の割れ，ふくれ，はがれが発生しているが活膜も多くある状態．	明らかに水道があり，塗膜の損傷や発錆が認められる．	発錆が広がり始め，塗膜の割れ，ふくれ，はがれも多数認められる．	ﾌｪｰｽﾌﾟﾚｰﾄに発錆が認められる	素線表面の亜鉛ﾒｯｷに腐食が出現し，その後，白色のパウダー状の残留物で覆われるがその下に鉄錆は発生していない．
加速期	発錆が広がり始め，塗膜の割れ，ふくれ，はがれも多数認められる．	発錆が広がり始め，塗膜の割れ，ふくれ，はがれも多数認められる．	発錆がはなはだしく，回転機構，移動機構は，その機能を有していない．	全面的に発錆が広がり，腐食による減肉が始まっている．	亜鉛ﾒｯｷが，ほとんど健全でなくなり，素線表面に沿って鉄錆が点在する．所々に亀裂が出現する．
劣化期	発錆がはなはだしく，すでに手でさわった程度で全てはがれる．	発錆がはなはだしく，減肉により所定の強度を保持していない．	腐食が激しく，手で触った程度で欠け落ちる．すでに鉛直力支持機能は有していない．	腐食による減肉が激しく，すでに所定の強度を保持していない．	素線表面に沿って，鉄錆が著しく発生しており，素線表面には窪みが出現している．素線に亀裂，破断が発生する直前と考えられる．

表2.3.2-2　鋼橋各部所の腐食による劣化対策

	対策				
	一般部	桁端部	支承（鋼製支承）	伸縮装置	ケーブル
潜在期	定期点検を継続する．	定期点検を継続する．			定期点検を継続する．
進展期	腐食が進んでいくと見受けられた場合，数年後に塗り替えることで計画を開始する．	伸縮装置からの漏水などがあれば，漏水を止める（伸縮装置の排水構造補修など）．			ケーブルのコーティング材などに破損があれば補修する．
加速期	早い時期での塗り替えを検討する．	早急に塗り替えを行う．			ケーブルの亜鉛メッキの補修を行う．またコーテイング材，ペースト材の取り替え（グレードアップ）を検討する．
劣化期	早急に塗り替えを行う．	早急に塗り替えを行う．また，腐食調査・強度計算を行い，部材取り替えを含めた検討を行う．			素線の破断状況を試験し，危険があればケーブルの取り替えを検討する．

(2)　亀裂

1)一般部

鋼橋の一般部材において発生する亀裂は疲労によるものが主体的であり，現在確認されている疲労損傷は，直接の輪荷重を受ける床組（鋼床版）と二次的部材の接合部に多く発生している．**図 2.3.2-2** は鋼橋における疲労の劣化の進行過程を定義したもので劣化の進行と性能低下の関係により定性的に表現されている．図中の縦軸の正側に劣化の進行を負側に性能の低下を表現している．横軸は劣化期間であり，**表 2.3.2-3** のように定義されている．

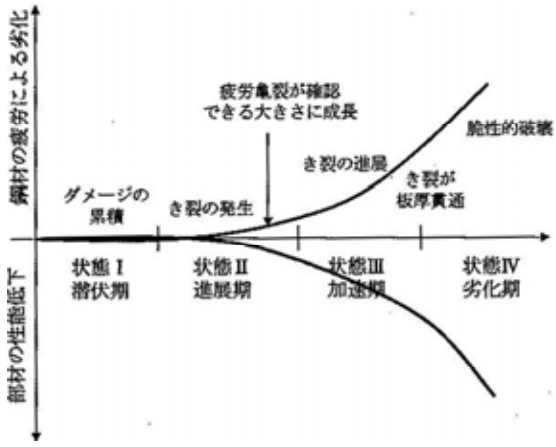


図2.3.2-2　鋼材の疲労による劣化進行過程

出典：「土木鋼構造物の点検・診断・
対策技術　　社団法人　日本鋼構造協会」

表2.3.2-3　鋼材の疲労による劣化期間の定義

劣化過程	定義	期間を決定する主要因
潜伏期	疲労損傷が設計限界（破壊確率 2.3%）に達するまでの期間	疲労累積損傷度，応力頻度
進展期	疲労損傷が累積し，疲労亀裂が点検で確認できるまでの期間	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，亀裂が鋼板を貫通するまでの期間	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の期間	疲労破壊，脆性破壊，塑性破壊

出典：「土木鋼構造物の点検・診断・
対策技術（社）　日本鋼構造協会」

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，発見するのは困難といえる．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．

2)添接部

一般的に摩擦接合用高力ボルトは，応力変動を受けにくいため，疲労による亀裂については，考慮しない．高

力ボルトの亀裂（破断）は，1970 年台に製作した橋梁で，F11T，13T を使用したことによる遅れ破壊によることが多い．一般に緩みがある場合を除いて，遅れ破壊を生じていても未破断のものは，健全なものと見分けがつかないため，製造期間が該当する橋梁では，たたき点検，超音波探傷試験などにより検査を行うしか方法がない．検査により損傷が発見されたか，実際に破断したボルトが発見された場合は，ボルトの取り替えを早期に検討する必要がある．現在のところ F10T に交換するのが一般的であり１本当たりの材料強度が劣るため，必要な本数を確保するには，諸処の検討が必要である．

3)付属物

支承に亀裂損傷が発生するのは，大きな地震に被災した場合と考えるのが一般的であるが，施工時の調整不足かその後の何らかの要因によって，回転機構や移動機構が異常な状態となり亀裂へと発展するケースも考えられる．伸縮装置は直接の走行荷重を受けるため，フェースプレートなどは疲労の影響を受けやすいが，実際には腐食が鋼材表面を粗雑にし，疲労へと発展し，最後にはフィンガーが破断するというケースも多々存在するようである．

表2.3.2-4　付属物の亀裂による劣化程度

	劣化程度	
	支承（鋼製支承）	伸縮装置
潜在期	移動機能，回転機能が低下している．	車両通過時に僅かに異常音が発生する．
進展期	滑り，転がり部に摩耗があり，ﾛｰﾗｰなどの部材に異常な変形が見受けられる．	ﾌｪｰｽﾌﾟﾚｰﾄに変形が見られる．溶接部に割れがある．
加速期	鉛直荷重支持部材にひび割れがある．	ﾌｪｰｽﾌﾟﾚｰﾄや溶接部に著しく割れが認められる．
劣化期	鉛直荷重を支持している部材が圧壊し，支持機能が果たせていない．ﾛｰﾗｰやﾍﾞｱﾘﾝｸﾞﾌﾟﾚｰﾄが逸脱する恐れがある．	ﾌｪｰｽﾌﾟﾚｰﾄのﾌｨﾝｶﾞｰが破断し，ｼｰﾙ材が噴き出ている．

表2.3.2-5　鋼橋各部所の亀裂による劣化対策

	一般部（鋼床版を含む）	支承（鋼製支承）	伸縮装置
潜在期	定期点検を継続する．亀裂が発見された時点で過渡期に記載する検討を早急に行う．	定期点検を継続する．	定期点検を継続する．
進展期	定期的に観察を続け，亀裂進展が速まっていると判断された時点でストップホールなどの対策を行う．	変形などの異常が，地震荷重などを受けて，すぐに落橋につながる損傷を受けるか検討し，危険となった場合は補修を行う．	ﾌｪｰｽﾌﾟﾚｰﾄの変形や割れの状況を測定し通行車両に危険があるようであれば，補修，取替などを検討する．
加速期	ｸﾞﾗｲﾝﾀﾞｰ，ｶﾞｳｼﾞﾝｸﾞ，コア抜きなどで亀裂を除去した後，再溶接や添接板，ﾌｨﾚｯﾄや補強材の追加による補修，補強を行う．また，全体系，または局所的に改良を行い応力集中の緩和を図る．	損傷した部材の取り替えを行う．	ﾌｪｰｽﾌﾟﾚｰﾄや溶接部の補修を行う．また，ﾌｪｰｽﾌﾟﾚｰﾄ厚を測定し，腐食疲労の危険度を検討する．
劣化期		支承全体の取り替えを含めて検討を行う．	損傷した以外のもを含めてﾌｪｰｽﾌﾟﾚｰﾄの取替えを行う．（強度については現交通の規格を考慮する）

第３章　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 塩害への対応策

(1)　対応策の要求性能

塩害への対応策として補修･補強を行う場合には，補修･補強に期待する効果を明確にする必要がある．

塩害による劣化は，コンクリート中へ侵入した塩化物イオンによる鉄筋腐食膨張によって進行する．このため，対応策に期待する効果としては，塩化物イオンのコンクリート中への供給を低減すること，既にコンクリート中に侵入した塩化物イオンを除去すること，腐食が開始した鋼材の腐食進行を抑制すること，鋼材腐食により低下した耐荷力を回復させること，などがあげられる．

(2)　要求性能の評価方法

a) 鋼材の腐食因子の供給量を低減

耐久性の観点から許容されるひび割れ幅[1)]より大きいひび割れが存在する場合，塩化物イオンが鉄筋位置に直接供給されることから，十分なかぶりが確保されていても鉄筋腐食が開始する可能性か大きい．このため，ひび割れ補修による塩化物イオンの侵入阻止が要求される．

劣化因子の侵入阻止を目的としたひび割れ補修では，施工直後および長期的観点から補修効果を確認することは必ずしも容易ではない．このため，必要に応じて部分的破壊試験（コア採取による注入状況の確認など）による評価を行うのがよい．また，構造物の体積変化や外力の作用によって補修部の損傷や新たなひび割れの発生も考えられるため，定期的な点検と対策の実施が望ましい．

コンクリート表面からの拡散浸透によって供給される塩化物イオンに対しては，表面処理（被覆や改質など）による浸透阻止または拡散低減などが要求される．

表面処理に対する評価は，適用材料（工法）の塩化物イオンの浸透阻止性能やしゃ水性能を事前に確認するとともに，対応策を実施した構造物での塩化物イオンの浸透阻止性能やしゃ水性能の確認，必要に応じて部分的破壊試験（保護層の厚さ測定など）等により行うことができる．また，長期的な性能は，促進試験等による適用材料（工法）の経年劣化により評価する方法がある．ただし，環境条件や施工条件などさまざまな要因によって，促進試験の結果が実構造物でも得られるとは限らないので，対応策を実施した構造物での保護層の割れ･剥離の有無，光沢･色差の計測，しゃ水性能の確認，必要に応じて部分的破壊試験（コア採取による塩分分析など）等により再評価を行うことが望ましい．

なお，表面処理の性能評価の詳細については，「表面保護工法 設計施工指針（案） および同［工種別マニュアル編］」[2)]を参考にするのがよい．

b) 鋼材の腐食因子の除去

コンクリート中の塩化物イオン量が腐食発生限界を超えて鉄筋腐食が開始している場合などには，コンクリートに含まれる塩化物イオンの除去が要求される．

電気化学的脱塩は，コンクリート中の塩化物イオンを電気泳動によって外部へ移動させ，鉄筋位置での塩化物イオン量を低下させる方法である．そのため，電気化学的脱塩の効果を評価するためには，鉄筋位置における塩化物イオン量が腐食を生じないレベルまで低下していることを確認する必要がある．確認は，部分的破壊試験（採取したコアの塩分分析など）によって行う．

断面修復は，塩化物イオンを含むコンクリートをはつり除去した後に，鉄筋を新しい材料で保護することによって不働態化させる方法である．断面修復では，既設コンクリートと修復材料との一体性が要求されることから，既設コンクリートや鉄筋に必要以上のダメージを与えないはつり除去方法の選択や，修復材料の性能評価（付着性能，ひび割れ抵抗性能，塩化物イオンの浸透阻止性能など）を行う必要がある．修復材料の性能評価の詳細については，「表面保護工法 設計施工指針（案）および同 ［工種別マニュアル編］」[2)]や「吹付けコンクリート指針（案）［補修･補強編］」[3)]等を参考にするのがよい．

塩害を受ける環境が変化しない場合には，電気化学的脱塩や断面修復を行った後に，塩化物イオン等の腐食因子の浸透が再度生じることから，表面処理（被覆，改質）などの対応策を併せて実施することによって塩化物イオンの浸透阻止を行うことが望ましい．

c) 鋼材の腐食進行を抑制

塩化物イオンが存在する環境においても鉄筋の腐食進行を抑制する方法としては，電気防食があげられる．コンクリート中の鉄筋はアノード反応によって腐食するが，電気防食は鉄筋の電位を制御することによってアノード反応を電気化学的に抑制することができる．長期的な鉄筋腐食の抑制効果は，適切

な防食電流が鉄筋に流れていることをモニタリングすることで評価できる．電気防食を適用する場合には，初期コストおよびランニングコストの面で他の工法よりも有利となるかの評価を行う必要もある．

d) 耐荷力の向上

塩害により劣化が進行した構造物では，鉄筋の腐食減量によって耐荷力が低下している場合が多い．耐荷力を向上させる方法としては，FRP･鋼板接着，外ケーブル補強，増厚･巻立て等，構造形式や損傷程度などによって適切に選定する必要がある．各種の補強工法に対する評価は，補強設計によって行うとともに，必要に応じて実験や解析によって照査する．また，対応策を実施した後は，鉄筋やコンクリートのひずみ計測，静的載荷によるたわみ測定，動的載荷による振動特性測定などにより評価することもできる．

(3) 要求性能に応じた対策工と具体的工法

塩害により性能低下した構造物に対する補修・補強は，外観上のグレーディング評価と標準的な工法を**表 3.1.1-1** に示す．また，期待する効果や劣化程度から選定される一般的な工法を**表 3.1.1-2** に示す．

塩害の場合，鉄筋周辺の塩化物イオン量が鋼材発錆塩化物イオン量未満の場合，表面被覆工法や断面修復工法などが有効である．一方，鉄筋周辺の塩化物イオン量が鋼材発錆塩化物イオン量を超えている場合，これらの補修工法のみでは，塩害劣化の進行を抑制することは難しく，腐食進行を抑制する電気防食工法，あるいは，塩化物イオン量を低減する電気化学的脱塩工法との併用が望ましい．

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て，適切な補強・補修工法を選定することが重要である．

具体的工法としては，補修・補強に関する指針及び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，表 3.1.1−3 に示す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 3.1.1-1 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
状態Ⅰ−1(潜伏期)	(表面処理)*
状態Ⅰ−2(進展期)	表面処理，電気防食，電気化学的脱塩
状態Ⅱ−1(加速期前期)	表面処理，断面修復，電気防食，電気化学的脱塩
状態Ⅱ−2(加速期後期)	断面修復
状態Ⅲ(劣化期)	FRP 接着，断面修復，外ケーブル，巻立て，増厚

*：予防的に実施される工法

出典：「2001 年制定　コンクリート標準示方書(維持管理編)　土木学会」

表 3.1.1-2　塩害に対する補修・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
劣化因子の遮断	◎	表面被覆 (表面からの Cl^-，O_2 などの腐食性物質の侵入防止)	△	表面被覆 (表面からの Cl^-，O_2 などの腐食性物質の侵入防止	△	表面被覆 (表面からの腐食性物質の侵入防止および，剥落防止)	△	表面被覆 (表面からの腐食性物質の侵入防止および，剥落防止)
			△	ひび割れ補修 （ひび割れからの H_2O，O_2 などの腐食性物質の侵入防止）	△	ひび割れ補修 （ひび割れからの H_2O，O_2 などの腐食性物質の侵入防止）	△	ひび割れ補修 （ひび割れからの H_2O，O_2 などの腐食性物質の侵入防止）
劣化速度の抑制	○	電気防食 (予防保全)	◎	電気防食 (鉄筋腐食の進行の大幅な低減)	◎	電気防食 (鉄筋腐食の進行の大幅な低減)	◎	電気防食 (鉄筋腐食の進行の大幅な低減)
劣化因子の除去			○	電気化学的脱塩 (限界値を超えた塩化物イオン量の低減)	◎	電気化学的脱塩 (限界値を超えた塩化物イオン量の低減)	◎	電気化学的脱塩 (限界値を超えた塩化物イオン量の低減)
			○	断面修復 (限界値を超えた塩化物イオンを含むコンクリートの除去)	◎	断面修復 (限界値を超えた塩化物イオンを含むコンクリートの除去)	◎	断面修復 (限界値を超えた塩化物イオンを含むコンクリートの除去)
耐荷力，変形性能の改善							◎	補強 (FRP・鋼板接着や巻立てなど)
							○	打換え (劣化した部分のコンクリートによる打換え)
工法選定の理由(要求性能)	腐食ひび割れは発生していない．鉄筋近傍では，塩化物イオン量が増加しているので，劣化因子の遮断を優先的に検討する．		鉄筋腐食が継続的に発生し，腐食ひび割れに至る段階．劣化因子の遮断だけでは十分な補修効果が期待できないため，鉄筋腐食の進行速度を抑制する工法が優先される．		腐食ひび割れが発生以降，急速な腐食が進行する段階．ひび割れ，浮きを生じたコンクリート除去や，鉄筋腐食の進行を抑制する工法が優先される．必要に応じて，表面被覆を併用する．		鉄筋の腐食に伴う断面積の減少により部材の耐荷力の低下が懸念される段階．劣化した部分の断面修復，鋼材腐食の進行を抑制するとともに，部材に耐荷性が懸念される箇所については，補強工も検討する．	

凡例　◎：主工法として適用する工法
○：主工法に次いで適用性の高い工法
△：構造物の劣化状況等に応じて適用を検討する工法

出典：「コンクリート診断技術 '05(基礎編)　日本コンクリート工学協会」

表3.1.1-3 研究会参加企業提供技術（塩害に対応する工法）

技術資料番号	技術名称	副題
2	ASフォーム工法	レジンコンクリートパネルによる表面保護工法
5	CS-21工法	コンクリート改質剤
6	HiPer CF工法	緩衝材を用いた炭素繊維シート接着工法
9	ＯＮＲ工法	Part1（塩害対策）
11	PC構造物に対する電気化学的脱塩	
12	ＴＤＲショット工法	硬化促進剤を用いた新しいコンセプトの湿式吹付け工法
13	TRUMP system	下弦ケーブルを用いた有ヒンジラーメン橋のたわみ抑止･回復対策工法
14	ＴＷＳ工法	ウレタン高圧注入漏水止水工法
16	アラミド繊維シート補強工法	
17	ｳｫｰﾀｰｼﾞｪｯﾄはつり工法を用いた大規模断面修復技術	
19	エバーコン	表面被覆工法
20	かみ合わせ鋼板巻立て工法	かみ合わせ継手を用いた無溶接型機械式鋼板巻立て工法
22	コリジョンジェット工法	コンクリートのはつり深さを高精度で制御できるウォータージェット
23	コロイダルシリカ	含浸性表面改質材
24	ジョッツ･クリート工法	液体急結剤を使用したポリマーセメントモルタル系断面修復工法
26	スムースボード工法	高靭性セメントボードを使用したコンクリート耐久性向上工法
28	ソルシャット工法	異なった材料の積層化による表面被覆工法
29	チタングリッドによる電気防食工法	帯状陽極を用いたコンクリート構造物の電気防食
30	ニッケル被覆炭素繊維シートを用いた電気防食工法	純国産材料による，”初の” 外部電源方式電気防食工法を実用化！
31	ハイブリッドシート工法	特殊ラミネートシートを用いたはく落対策工法
32	ピングラウト工法	発泡ウレタン注入による止水工法
35	リフレッシュシャワー工法	含浸防水材を用いた床版防水工法
37	犠牲陽極材「ガルバシールドF」	
39	浸透性吸水防止材「マジカルリペラー」	コンクリートの耐久性を向上させる表面保護材料
40	吹付けモルタルによる耐震補強工法	薄い断面増加でRC断面増し厚工法と同程度の補強可能
41	繊維補強超速硬コンクリート補修工法	
43	炭素繊維シート補強工法	炭素繊維シートを用いたＲＣ構造物の補修･補強工法
45	脈動ひび割れ注入工法	
46	無機系封孔剤	

3.1.2 アルカリ骨材反応への対応策

(1) 対応策の要求性能

アルカリ骨材反応への対応策として補修･補強を行う場合には，補修･補強に期待する効果を明確にする必要がある．

アルカリ骨材反応による膨張劣化は反応性の骨材とセメントに起因するアルカリおよび水分の存在化で進行するため，劣化を抑制するためには外部からの水分を遮断し，コンクリート内部の水分を逸散させることが有効である．ここで，これらの対策効果を十分発揮させるためには，ジョイント部等からの漏水処理や，構造物全体の排水処理を適切に行う必要がある．また，最近報告されているように，コンクリートの膨張による鉄筋降伏・破断等により構造物の耐荷力が低下している場合も想定されるため，現有耐荷力を評価し，結果によっては耐荷力を確保する対応策が必要となることもある．

したがって，対応策に期待する効果としては，アルカリ骨材反応による膨張抑制を目的として，コンクリート中への水分の進入を抑制または遮断すること，コンクリート内部の水分を逸散すること，膨張を拘束すること，等が挙げられる．また，耐荷性能が低下している場合の期待する効果としては，耐荷性能，変形性能を確保することが挙げられる．

(2) 要求性能の評価方法

a) 進行抑制（劣化因子の遮断・抑制）

アルカリ骨材反応は，反応性骨材，アルカリ，水分の存在で進行する．したがって，膨張を抑制する対応策としては，外部からの水分，アルカリの遮断を目的とした表面処理（被覆，含浸）やひび割れ注入工法が挙げられる．ただし，アルカリおよび水分はもともとコンクリート中にも存在するため，外部からの水分やアルカリを遮断しても，膨張進行に十分な水分やアルカリがコンクリート内部に存在する場合には膨張の進行を完全に停止することはできないことに留意する必要がある．

水分等の遮断を目的とした表面処理に対する評価は，しゃ水性，ひび割れ追従性，コンクリートとの付着性等を事前に確認すること，また実際に対策を施した構造物を対象とした付着試験等の部分的破壊試験により行うことができる．

水分等の劣化因子や鉄筋の腐食性物質の遮断を目的としたひび割れ補修では，その対策効果を確認することは比較的困難であるが，評価方法としては採用工法の実績や施工計画の確認，必要に応じて部分的破壊試験（コア採取など）によって行うのがよい．

劣化因子である水分を除去するとともに，外部からの水分の供給抑制を目的としたシラン系撥水剤に代表される表面含浸工法の評価は，水蒸気透過性や透水性，透気性等を確認することで行うことができる．

劣化速度を抑制する方法として，リチウムイオンを含む水溶液をコンクリート表面より含浸する方法やコンクリート内部に圧入，拡散させる工法が開発されている．これらの工法の評価は，必要に応じてリチウムイオンの浸透深さや浸透量，また膨張量等を部分的破壊試験（コア採取など）によって確認するのがよい．

上記対策の長期的な性能の評価は，適用工法（材料）を対象とした促進試験等により評価することも可能であるが，環境条件や施工条件により，促進試験結果と実構造物での性能は異なることも考えられるため，定期点検や追跡調査等により保護層の割れ･剥離の有無，光沢･色差の計測，塩化物イオンの浸透阻止性能やしゃ水性能の持続性等を評価することが望ましい．

なお，表面処理工法の性能評価の詳細については，「表面保護工法 設計施工指針（案）および同 ［工種別マニュアル編］」[2)]を参考にするのがよい．

b) 膨張拘束

橋台・擁壁のように対策を施しにくい箇所から水分供給の影響を受ける場合等には，FRP や鋼板補強などの膨張抑制効果を期待した補修が必要となることもある．

膨張拘束に対する評価は，設定した残存膨張に対する拘束効果があることを，使用した材料の力学的試験やコンクリートとの付着性の確認等で行うことができる．長期的な評価は，鋼板・FRP 材のはく離や表面変状を確認するとともに，必要に応じて経時的な変形やひずみを測定することも有効である．

c) 劣化部を取り除く

アルカリ骨材反応による劣化が顕在化した場合には，劣化部分を取り除き断面修復を行うことも有効である．膨張反応が収束している場合の評価は，既設コンクリートとの付着性，断面修復材の力学的性能，ひび割れ抵抗性等によって行うのがよい．また，補修後の残存膨張が想定される場合には未補修部分との一体性が保たれるような材料を選定する必要がある．

なお，断面修復工の性能評価の詳細については，「表面保護工法 設計施工指針（案）および同 ［工種別マニュアル編］」[2)]や「吹付けコンクリート指

針（案）[補修・補強編]」[3]を参考にするのがよい．

d) 耐荷力を向上

アルカリ骨材反応による膨張ひび割れは構造物の耐荷力に影響することは少ないとされてきたが，最近の調査でアルカリ骨材反応によるコンクリートの膨張によって，RC 構造物中の曲げ加工部や圧接継手箇所の一部で鋼材が破断している事例が報告されている．このような耐荷性能の低下の可能性がある構造物には，増厚，鋼板・FRP 接着，プレストレスの導入等の補強対策が必要となることもある．ここで，補強においては，アルカリ骨材反応により劣化した構造物の現有耐荷性能の評価が重要であるが，残存供用期間および維持管理に要する費用等を総合的に判断する必要がある．

補強工法に対する評価は，それぞれの補強対策に応じ，各材料やプレストレス等の性能，設計値を確認すること，補強効果を実験や解析により確認することで行うことができる．長期的な評価は，定期点検等により増厚材や鋼板・FRP 材のはく離や変状の有無を確認することで行うことができる．

なお，性能評価の詳細については，「コンクリート構造物の補強指針（案）」[4]や「アルカリ骨材反応対策小委員会報告書」[5]等を参考にするのがよい．

(3) 要求性能に応じた対策工と具体的工法

アルカリ骨材反応により性能低下した構造物に対する補修・補強は，期待する効果や劣化状態に応じて**表 3.1.2-1** に示される工法の中から選定されることが一般的に推奨されている．**表 3.1.2-1** は，補修・補強に対する要求性能を縦軸として，1)劣化因子の遮断，2)劣化速度の抑制，3)劣化因子の除去，4)耐荷力，変形性能の改善に大別し，横軸に劣化の進行過程を示すことにより，適用される補修・補強工法を取りまとめたものである．

1)劣化因子の遮断

①表面被覆工

外部からの水分供給を遮断することを目的とした工法であり，潜伏期から加速期にかけて広く適用される．劣化期においては，はく落防止としての効果も期待して適用される場合がある．表面被覆材には有機系，無機系でさまざまな種類の材料があるため，各機関が定めている表面被覆材の規格などを参考にして選定するとよい．

表面被覆工を適用する場合，外部からの水分供給を完全に遮断することが理想であるが，例えば橋台や擁壁のように背面側が土砂に接する構造物などでは困難となる．遮水性の高い被覆材を用いた場合では，逆にコンクリート内部の水分逸散を阻害し，その水分によって ASR が促進された事例もある．また，伸び能力の高い材料を用いた場合，補修後の塗膜表面に変状が見られなくても，以後の ASR の進行により塗膜下のコンクリートにひび割れが再発した事例もある．これらの再劣化事例も踏まえて，構造物の環境条件や構造条件などを十分検討した上で適用することが重要である．

②ひび割れ補修

ひび割れからの水分供給を遮断する目的とした工法であり，ひび割れの発生する進展期から劣化期にかけて広く適用できる．ただし，ひび割れ注入工法単独での ASR 抑制効果は少ないため，表面被覆工法など他工法との併用を前提とする必要がある．

2)劣化速度の抑制

①拘束

ASR によるコンクリート膨張に対し，外部からの拘束により膨張の進行を抑制する工法である．拘束の方法として，FRP シート，鋼板，RC，PC，プレストレスの導入などがある．目的が膨張の抑制であるため，既に膨張が収束した劣化期以外に対して適用できる．

部材形状が複雑であったり，設置可能範囲が限られている場合などでは，十分な膨張拘束効果を得ることができない場合があるため，適用にあたっては構造物の条件に応じて十分検討する必要がある．橋脚柱部材などでは，耐震補強としての各種巻立て工法と兼用される場合もあるが，必要な補強量の算定方法など十分な検討が必要となる．

②含浸材塗布（リチウム系化合物）

ASR によるコンクリート膨張に対し，リチウム系化合物の水溶液を構造物表面から含浸させ，膨張の進行を抑制する工法である．この工法はリチウムのイオン浸透に多大な時間を必要とするため，最近では次の内部圧入工法が提案されている．

③内部圧入工（リチウム系化合物）

リチウム系化合物の水溶液を構造物内部へ加圧注入し，拡散させることにより，膨張の進行を抑制する工法である．使用するリチウム系化合物として，亜硝酸リチウムが用いられている．アルカリシリカゲルの膨張性を非膨張性へと化学変化させることを目的とするため，進展期，加速期の構造物に対する適用性が高い．

3)劣化因子の除去

①含浸材塗布（シラン系撥水材）

外部からの水分供給を遮断すると同時に，内部の水分を逸散させることを目的とした工法で，表面被覆工と同様に潜伏期から加速期にかけて適用することができる．

ASR による劣化の場合，遮水性の高い被覆材により表面被覆することにより，コンクリート内部の水分逸散を阻害し，ASR を促進することがあるため，近年ではシラン系撥水材による含浸材塗布工の実績が増えている．

含浸性能や長期耐久性能などに対する課題もあるが，それらに関する研究報告も多くなされている．

②断面修復工

ASR により劣化したコンクリートを部分的にはつり取り，断面修復材により修復する工法であり，主に外観変状が著しく，膨張が収束している劣化期の構造物に対しての適用性が高い．断面修復工法には，左官工法，吹付け工法，充填工法などがあり，修復範囲や部位，施工条件などを考慮して適切な施工法を選定する必要がある．

4)耐荷力，変形性能の改善

①補強

補強工法は，ASR により劣化した構造物の耐荷性能（曲げ耐力，せん断耐力，剛性，変形性能など）を所要のレベルまで向上させることを目的として適用されるが，前述した膨張拘束効果も併せて期待されることもある．補強工法として，コンクリート増厚工法，各種巻立て工法（FRP シート，鋼板，PC パネルなど），各種接着工法（FRP シート，鋼板など），プレストレスの導入などがあるまた，桁や壁の増設，支持点増設なども補強工法に分類される．ASR による鉄筋破断を生じた構造物の場合，鉄筋による拘束効果が低下することにより，コンクリートの強度や静弾性係数の低下などが顕在化し，耐荷性能やたわみ性能に問題が生じる可能性があるため，補強が必要となる場合がある．補強工法は主に劣化期の構造物に対して適用されることが多い．工法の選定にあたっては，構造物の要求性能を十分検討，評価して適切な工法を適用することが重要である．

②打換え

ASR による劣化の著しい構造物や，鉄筋破断を生じた構造物においては，費用対効果を考慮して，部材の打換え工法が選択される場合がある．打換え工法の施工期間中には交通規制などを伴うことも想定されるため，構造物の供用状況や施工条件などを十分考慮して 計画する必要がある．

なお，**表 3.1.2-1** の適用性欄の◎，○，△の記号は，当該工法の一般的な適用性について示したものであり，絶対的な評価という意味ではないことに注意が必要である．**表 3.1.2-1** に基づく具体的工法の選定手順であるが，当表は，要求性能と劣化進行過程の 2 つの要素による工法選定表であるため，対策工の工法選定方針を示すものである．従って，具体的工法の選定については以下の内容を考慮し，使用する材料を含めて選定する必要がある．

（環境について）

・直射日光（紫外線）を受ける．

・直接風雨にさらされる．

・構造物背面が土砂と接している（橋台など）．

・常に水分の供給がある（地下水，河川など）．

（状態について）

・漏水を伴っている．

・常時湿潤状態にある．

・振動の影響を受ける．（床版等）

（対策工の方向について）

・対策工を実施する方向に作業空間が確保できない等作業方向が限定される．

ASR により劣化した構造物の補修，補強工法についての現状は，これまでの種々の知見から具体的に適用可能な工法が分かってきたというところである．技術として十分確立されているとは言えず，さらなる研究，検討が不可欠であろう．そのような状況も踏まえた上で，各構造物の要求性能や劣化の状態，その他諸条件を十分考慮して適切な工法を選定することが重要である．

延命化対策工選定システムに関しても，**表 3.1.2-1** を基本として選定フローが組み立てられているため，前述の内容を考慮した上で具体的工法を選定することが重要である．

具体的工法としては，補修・補強に関する指針及び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，表 3.1.2－2 に示す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3.1.2-1　アルカリ骨材反応に対する補修・補強の選定

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
劣化因子の遮断	◎	表面被覆（表面からの水分の侵入防止）	◎	表面被覆（表面からの水分の侵入防止）	◎	表面被覆（表面からの水分の侵入防止，および剥落防止）	○	表面被覆（表面からの水分の侵入防止，および剥落防止）
		——	◎	ひび割れ補修（ひび割れからの腐食性物質の侵入防止）	◎	ひび割れ補修（ひび割れからの腐食性物質の侵入防止）	○	ひび割れ補修（ひび割れからの腐食性物質の侵入防止）
劣化速度の抑制	○	拘束（FRP・鋼板巻立て，PC 巻立てなど）	○	拘束（FRP・鋼板巻立て，PC 巻立てなど）	○	拘束（FRP・鋼板巻立て，PC 巻立てなど）		——
	○	含浸材塗布（リチウム系化合物の塗布含浸）	△	含浸材塗布（リチウム系化合物の塗布含浸）	△	含浸材塗布（リチウム系化合物の塗布含浸）		——
劣化因子の除去	◎	含浸材塗布（コンクリート中の水分の蒸発が可能な含浸処理）	◎	含浸材塗布（コンクリート中の水分の蒸発が可能な含浸処理）	◎	含浸材塗布（コンクリート中の水分の蒸発が可能な含浸処理）	○	断面修復（劣化部分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・鋼板接着や巻立てなど）
		——		——		——	○	打換え（劣化した部材のコンクリートによる打換え）
工法選定の理由（要求性能）	ひび割れが発生しておらず，残存膨張量は最大となる。この段階では表面被覆あるいは撥水系の表面含浸処理をまず検討する。 被覆材選定には，遮水性，水蒸気透過性，ひび割れ追従性などが重視される。		ひび割れが発生しており，膨張速度が大きくなる。潜伏期で記述した工法にひび割れ補修を組み合わせたものが一般的であるが，膨張量が大きい場合には，拘束工法を適用してもよい。補強材への要求性能としては，コンクリートとの一体性が挙げられる。		既に膨張速度は収束しつつある。耐荷力や変形性能の低下が懸念されるような場合には，拘束効果も期待した補強工法が推奨される。そのような懸念のない場合は，表面被覆や表面含浸処理を適用する。		膨張は終了しているので，膨張に対する対策は必要ない。コンクリートの物理的な劣化状況により，ひび割れ注入，断面修復，補強などを使い分ける。	

（注）記号は以下の意味をもつ
◎：主工法として適用すべき工法
○：主工法に次いで適用性の高い工法
△：構造物の劣化状況等に応じて適用を検討する工法

出典：「コンクリート診断技術'03（基礎編）　(社)日本コンクリート工学協会」

表3.1.2-2 研究会参加企業提供技術（アルカリ骨材反応に対応する工法）

技術資料番号	技術名称	副題
1	ＡＳＲリチウム工法	既設構造物のアルカリ骨材反応抑制工法
2	ASフォーム工法	レジンコンクリートパネルによる表面保護工法
5	CS-21工法	コンクリート改質剤
6	HiPer CF工法	緩衝材を用いた炭素繊維シート接着工法
7	ＮＡＰＰ工法	中空PC鋼棒を使用したプレテンション方式によるPC工法
8	OES工法	
10	ＰＣコンファインド工法	ＰＣ鋼材を用いた橋脚巻立て耐震補強（水中施工法）
13	TRUMP system	下弦ケーブルを用いた有ヒンジラーメン橋のたわみ抑止・回復対策工法
16	アラミド繊維シート補強工法	
17	ｳｫｰﾀｰｼﾞｪｯﾄはつり工法を用いた大規模断面修復技術	
19	エバーコン	表面被覆工法
20	かみ合わせ鋼板巻立て工法	かみ合わせ継手を用いた無溶接型機械式鋼板巻立て工法
23	コロイダルシリカ	含浸性表面改質材
24	ジョッツ・クリート工法	液体急結剤を使用したポリマーセメントモルタル系断面修復工法
26	スムースボード工法	高靭性セメントボードを使用したコンクリート耐久性向上工法
28	ソルシャット工法	異なった材料の積層化による表面被覆工法
39	浸透性吸水防止材「マジカルリペラー」	コンクリートの耐久性を向上させる表面保護材料
42	耐酸コンクリート工法	硫酸イオンに強い酸性河川・酸性地盤対応コンクリート
45	脈動ひび割れ注入工法	
46	無機系封孔剤	
47	アイゾールEX工法	撥水・表面防水・浸透防水のトリプル効果をもつ透湿性被膜が、コンクリートの劣化を抑制する。
	合計 21技術	

3.1.3 疲労への対応策

(1) 対応策の要求性能

疲労への対応策として補修･補強を行う場合には，補修･補強に期待する効果を明確にする必要がある．

疲労による劣化では，繰返し荷重によるひび割れの進展やひび割れの開口による磨減りや角落ち，部材剛性の低下等が顕在化する．また，劣化の進行は水の供給によって促進される．このため，対応策に期待する効果としては，落下物による第三者影響度や美観・景観を改善すること，水の影響を除くこと，ひび割れの開口を抑制すること，断面剛性を向上すること，等が挙げられる．

(2) 要求性能の評価方法

a) 第三者影響度，美観・景観の改善

疲労の進行によってコンクリートがはく離・はく落した場合，下部を通行する第三者に被害を及ぼしたり，美観・景観を損ねたりする．このような場合，部材を広く覆うような表面処理（被覆）によるはく落防止や修景が必要である．ただし，表面処理（被覆）は部材に対する補強効果は無いため，疲労そのものを抑制するものではないことに注意しなければならない．

表面処理（被覆）に対する評価は，はく離抵抗性や付着性，ひび割れ追従性，耐候性等を事前に確認するとともに，必要に応じて施工後に部分的破壊試験によって被覆材の接着強度や厚さ等を確認する．また，長期的な性能は，促進試験等による性能の経時変化により評価する方法がある．ただし，促進試験が必ずしも実構造物の環境条件や施工条件を現しているとは限らないので，実構造物において被覆材の経年劣化や損傷を確認するために被覆材の変色，割れ，はく離の有無等を確認することが望ましい．

表面処理（被覆）の性能評価の詳細については，「表面保護工法 設計施工指針（案）【工種別マニュアル編】」[2]や「コンクリート片はく落防止対策マニュアル」[6]等を参考にするのがよい．

b) 水の影響を除くことによる疲労耐久性の向上

疲労は水の供給がある場合，乾燥状態に比べて促進されるため，劣化を助長させないためには水の供給を遮断する必要がある．部材への水は主に橋面から供給されるため，水の供給を遮断するには床版防水が効果的である．ただし，床版防水は水の影響による疲労の助長を抑制するものであり，疲労そのものを抑制するものではないことに注意しなければならない．

床版防水に対する評価は，しゃ水性や付着性，ひび割れ追従性，舗装施工時の高温に対する耐熱性等を事前に確認するとともに，必要に応じて施工後に部分的破壊試験によって防水層の接着強度や厚さ等を確認する．また，長期的な性能は，促進試験等による性能の経時変化により評価する方法がある．ただし，促進試験が必ずしも実構造物の環境条件や施工条件を現しているとは限らないので，実構造物において防水層の経年劣化や損傷による漏水の有無を確認するとともに，必要に応じて部分的破壊試験（コア採取や舗装撤去等）を行い，防水層の劣化や損傷の有無を確認することが望ましい．ただし，劣化の進行程度によっては補強を検討しなければならない．

防水層の性能評価の詳細については，「防水システム　設計・施工マニュアル（案）」[7]を参考にするのがよい．また，防水層は舗装の打換え時に損傷するため，舗装と同時に更新するのがよい．

c) ひび割れ開口の抑制による疲労耐久性の向上

繰返し荷重によってひび割れが開閉すると，ひび割れの進展やひび割れ面の擦り減りによって疲労が進行する．このような場合，ひび割れの開口を抑制する鋼板や FRP 接着，プレストレスの導入が効果的である．ただし，部材に水の供給がある場合は接着面のはく離が生じるため，防水や止水，導水を併用しなければならない．また，プレストレスの導入に当たっては，コンクリート強度が十分であることの確認が必要である．

補強工法に対する評価は，疲労耐久性に対する補強効果を事前に促進試験や解析により確認するとともに，必要に応じて載荷試験によって補強前後の変位やひずみの変化等を確認する．また，長期的な性能の評価は，接着面のはく離やプレストレスの損失，ひび割れ等の変状の有無を確認するとともに，必要に応じて載荷試験により経時的な変位やひずみの変化を確認することが望ましい．

補強工法の性能評価の詳細については，「設計要領第二集橋梁保全編」[8]や「炭素繊維シート接着工法による道路橋コンクリート部材の補修・補強に関する設計・施工指針(案)」[9]を参考にするのがよい．

d) 引張縁への部材設置による断面剛性の回復

疲労の進行を抑制するためには，部材の断面剛性を高くして変位を小さくすることが挙げられる．このような場合，部材下面の引張縁への鋼板や FRP 接着，断面の増厚，部材の増設が効果的である．ここで，部材に水の供給がある場合は接着面や増厚面のはく離が生じるため，防水や止水，導水を併用しなければならない．また，部材を増設する場合は，モ

ーメントやせん断力の分布の変化について検討する必要がある．

補強工法に対する評価は，疲労耐久性に対する補強効果を事前に促進試験や解析により確認するとともに，必要に応じて載荷試験によって補強前後の変位やひずみの変化等を確認する．また，長期的な性能の評価は，接着面や増厚面のはく離や増設部材近傍のひび割れ等の変状の有無を確認するとともに，必要に応じて載荷試験により経時的な変位やひずみの変化を確認することが望ましい．

補強工法の性能評価の詳細については，「設計要領第二集橋梁保全編」[8]（日本道路公団）や「炭素繊維シート接着工法による道路橋コンクリート部材の補修・補強に関する設計・施工指針(案)」[9]（旧建設省土木研究所）を参考にするのがよい．

ｅ）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

疲労による破壊形式は，特に床版において押抜きせん断破壊となるため，対策としてせん断剛性および耐力の向上が挙げられる．このような場合，部材上面の増厚が効果的である．ただし，床版上面に対する補強となるため，施工時には交通を遮断する必要がある．

補強工法に対する評価は，疲労耐久性に対する補強効果を事前に促進試験や解析により確認するとともに，必要に応じて載荷試験によって補強前後の変位やひずみの変化等を確認する．また，長期的な性能の評価は，増厚面のはく離や部材下面のひび割れ等の変状の有無を確認するとともに，必要に応じて載荷試験により経時的な変位やひずみの変化を確認することが望ましい．

性能評価の詳細については，「橋梁床版上面増厚工法設計・施工マニュアル」[10]を参考にするのがよい．

(3)　要求性能に応じた対策工と具体的工法

疲労により性能低下した構造物の要求性能に応じた対策工法は，期待する効果によって表 3.1.3-1 に示される補修・補強工法の中から選定されるのが一般的である．また，工法の選定に当たっては，構造物の劣化のグレードを状態を考慮する必要があり，その標準的な工法を**表 3.1.3-2** に示す．基本的に，潜伏期，進展期および劣化期においては，補修および補強工法の対策を実施するが，床版に抜け落ちなどの現象が見られる劣化期においては，コンクリートの打替えもしくは状況に応じて床版の取替を実施するのが望ましいと考えられる．以下に具体的な工法について記す．

「第三者影響度，美観・景観の改善」に対しては，一般に表面処理（被覆）工法を実施するのが望ましい．床版においては，下面からコンクリートがはく落するのを防止するために，ビニロン繊維シートやガラス繊維シートを用いた塗布接着形シート工法が有効である．

「水の影響を除くことによる疲労耐久性の向上」に対しては，一般に床版防水を実施するのが望ましい．コンクリートは水の影響により，疲労が著しく助長されることが知られており，床版の疲労においても，水の供給を断つことが重要である．具体的な工法としては，特殊アスファルトを含浸させたシート系の防水層や，合成ゴム系やアスファルト系の塗膜系の防水層がある．

「ひび割れ開口の抑制による疲労耐久性の向上」に対しては，一般にＦＲＰ接着やプレストレスの導入を実施するのが望ましい．ＦＲＰ接着は一般に炭素繊維シートなどを損傷した床版の引張応力作用面にエポキシ樹脂などを含浸させて接着する工法で，曲げひび割れの開口を拘束し，たわみを低減することができる．また，プレストレスの導入は，鋼主桁に外ケーブル工法を用いること多い．これにより，橋軸方向の軸力が床版に伝達され，床版のひび割れが制御される．

「引張縁への部材設置による断面剛性の回復」に対しては，一般に床版下面への鋼板接着，ＲＣ断面の増厚（下面増厚），増設桁の設置などを実施するのが望ましい．鋼板接着工法は，5㎜ 程度の鋼板を床版下面に，ホールインアンカーとエポキシ樹脂で接着することにより，曲げ耐力の向上を図る工法である．下面増厚は，床版下面に鉄筋などの補強材を配置し，これを接着性に優れたポリマーセメントモルタルをコテ塗りあるいは吹付けることにより一体化する工法である．増設桁の設置は，床版を支持する既存の主桁または縦桁の間に新たに縦桁を増設し，床版を直接指示し，床版に作用する曲げモーメントを低減する工法である．

「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」に対しては，一般に上面増厚を実施するのが望ましい．上面増厚は，床版上面にスチールファイバーコンクリートを打設することにより，有効厚が増し，曲げ剛性・せん断耐力が向上する工法である．

劣化期における床版の取替工法には，従来の RC プレキャスト床版と比較し，剛性が高く，かつ軽量なプレキャスト合成床版が数種開発されている．こ

表 3.1.3-1　対策に期待する効果と工法

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

出典：「2001 年制定　コンクリート標準示方書（維持管理編）　土木学会」

表 3.1.3-2　床版の疲労による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）	床版防水，
Ⅱ（進展期）	床版防水，鋼板・FRP 接着，上面増厚，下面増厚，増設桁
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
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
Ⅳ（劣化期）	供用制限，打替え

出典：「2001 年制定　コンクリート標準示方書（維持管理編）　土木学会」

れらは，耐用年数が長く，ライフサイクルコストを考慮する上で有効である．

具体的工法としては，補修・補強に関する指針及び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，表 3.1.3−3 に示す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3.1.3-3 研究会参加企業提供技術（疲労に対応する工法）

技術資料番号	技術名称	副題
2	ASフォーム工法	レジンコンクリートパネルによる表面保護工法
6	HiPer CF工法	緩衝材を用いた炭素繊維シート接着工法
8	OES工法	
13	TRUMP system	下弦ケーブルを用いた有ヒンジラーメン橋のたわみ抑止･回復対策工法
16	アラミド繊維シート補強工法	
17	ｳｫｰﾀｰｼﾞｪｯﾄはつり工法を用いた大規模断面修復技術	
21	クイック･チェンジ工法	床版取替工法
24	ジョッツ･クリート工法	液体急結剤を使用したポリマーセメントモルタル系断面修復工法
26	スムースボード工法	高靭性セメントボードを使用したコンクリート耐久性向上工法
31	ハイブリッドシート工法	特殊ラミネートシートを用いたはく落対策工法
35	リフレッシュシャワー工法	含浸防水材を用いた床版防水工法
38	高靭性FRCを用いたハーフプレキャスト合成床版工法	
41	繊維補強超速硬コンクリート補修工法	
43	炭素繊維シート補強工法	炭素繊維シートを用いたＲＣ構造物の補修･補強工法
	合計 14技術	

3.1.4 中性化への対応策

(1) 対応策の要求性能

中性化への対応策として補修･補強を行う場合には，補修･補強に期待する効果を明確にする必要がある．

中性化による劣化は，炭酸化反応によって pH が低下したコンクリート中の鋼材腐食によって進行する．このため，対応策に期待する効果としては，中性化の進行を抑制すること，pH の回復により中性化深さを０にすること，腐食が開始した鋼材の腐食進行を抑制すること，鋼材腐食により低下した耐荷力を回復させること，等があげられる．

(2) 要求性能の評価方法

a）中性化の進行抑制

耐久性の観点から許容されるひび割れ幅[1)]より大きいひび割れでは，水や酸素が鉄筋位置に直接供給されることによって，十分なかぶりが確保されていても鉄筋腐食が進行する可能性が大きい．このため，ひび割れ補修による水と酸素の遮断が要求される．

劣化因子の遮断を目的としたひび割れ補修では，施工直後および長期的観点から補修効果を確認することは必ずしも容易ではない．このため，必要に応じて部分的破壊試験（コア採取による注入状況の確認など）による評価を行うのがよい．また，構造物の体積変化や外力の作用によって補修部の損傷や新たなひび割れの発生も考えられるため，定期的な点検と対策の実施が望ましい．

コンクリート表面から拡散浸透する二酸化炭素に対しては，表面処理（被覆や改質など）による二酸化炭素，水，酸素の浸透阻止または拡散低減などが要求される．

表面処理に対する評価は，適用材料（工法）の透気性やしゃ水性を事前に確認するとともに，対策を実施した構造物での透気性や遮水性の確認，必要に応じて部分的破壊試験（保護層の厚さ測定など）等により行うことができる．また，長期的な性能は，促進試験等による適用材料（工法）の経年劣化により評価する方法がある．ただし，環境条件や施工条件などさまざまな要因によって．促進試験の結果が実構造物でも得られるとは限らないので，対応策を実施した構造物での保護層の割れ･剥離の有無，光沢･色差の計測，透気性やしゃ水性の持続性等を確認する．必要に応じて部分的破壊試験（コア採取による中性化深さの測定など）等により再評価を行うことが望ましい．

なお，表面保護の性能評価の詳細については，「表面保護工法 設計施工指針（案）および同 【工種別マニュアル編】」[2)]を参考にするのがよい．

b）中性化の深さを 0 にする

コンクリート中の鉄筋近傍まで中性化が進行し，鉄筋の腐食が開始している場合には，コンクリートの再アルカリ化や中性化領域のコンクリートの除去が要求される．

再アルカリ化は，中性化したコンクリートのアルカリ性を回復することによって，鉄筋を不働態化させる方法である．このため，評価方法としては，部分的破壊試験（コア採取による中性化深さ測定など）があげられる．

断面修復は，中性化したコンクリートをはつり除去した後に，鉄筋を新しい材料で保護することによって不働態化させる方法である．新しい材料に置き換えることから，初期の評価では確認試験等を実施しなくても新設の状態に戻ったと評価される．

再アルカリ化や断面修復の長期的な評価は，部分的破壊試験（コア採取による中性化深さ測定など）によりアルカリ性の保持状態や外観調査による変状の有無などによって行われる．対策の前後では環境条件が変わらない場合が多いため，一般的には中性化による再劣化が考えられる．このため，二酸化炭素の拡散を阻止する表面処理（被覆や改質）などの対応策を併せて実施することが重要である．

c）鉄筋の腐食進行を抑制

コンクリートの pH が低下して不働態被膜が消失した状態においても鉄筋の腐食進行を抑制する方法としては，電気防食があげられる．コンクリート中の鉄筋はアノード反応によって腐食するが，電気防食は鉄筋の電位を制御することによってアノード反応を電気化学的に抑制することができる．長期的な鉄筋腐食の抑制効果は，適切な防食電流が鉄筋に流れていることをモニタリングすることで評価できる．電気防食を適用する場合には，初期コストおよびランニングコストの面で他の工法よりも有利となるかの評価を行う必要もある．

d）耐荷力を向上

中性化により劣化が進行した構造物では，鉄筋の腐食減量によって耐荷力が低下している場合が多い．耐荷力を向上させる方法としては，FRP･鋼板接着，外ケーブル補強，増厚･巻立て等，構造形式や損傷程度などによって適切に選定する必要がある．各種の補強工法に対する評価は，補強設計によって行うとともに，必要に応じて実験や解析によって照査する．また，対応策を実施した後は，鉄筋やコン

クリートのひずみ計測，静的載荷によるたわみ測定，動的載荷による振動特性測定などにより評価することもできる．

(3) 要求性能に応じた対策工と具体的工法

中性化により性能低下した構造物に対する補修・補強は，期待する効果や劣化程度に応じて**表 3.1.4-1** に示される工法の中から選定されるのが一般的である．

表 3.1.4-1 は，補修・補強に対する要求性能を縦軸として，1)劣化因子の遮断，2)劣化速度の抑制，3)劣化因子の除去，4)耐荷力，変形性能の改善に大別し，横軸に劣化の進行過程を示すことにより，適用される補修・補強工法を取りまとめたものである．また，**表 3.1.4-1** に示す要求性能は，前述の(2)要求性能の評価方法に示される a)～d)の各要求性能と，おおよそ以下のように対応していると考えてよい．

a)中性化の進行を抑制→1)劣化因子の遮断
b)中性化の深さを 0 にする→3)劣化因子の除去
c)鉄筋の腐食進行を抑制→2)劣化速度の抑制
d)耐荷力を向上→4)耐荷力，変形性能の改善

なお，電気防食工法は，対策目的がコンクリート中の鉄筋の腐食反応を停止させることにあることから，中性化により劣化した構造物の対策工として適用することは可能である．しかし、電気防食工法は，主として塩害により劣化した構造物を対象としており，中性化による劣化の対策工としての事例が認められないため，本報告書では一般的な工法の分類として**表 3.1.4-1** からは除外している．

1)劣化因子の遮断

ⅰ)表面被覆

構造物の表面に被覆材料を塗布することにより，表面からの CO_2，H_2O，O_2 などの鋼材に対する腐食性物質の侵入防止を目的とする工法であり，主に潜伏期から進展期に適用される．また，加速期から劣化期においては，シートやメッシュで表面を覆うことにより，はく落防止効果を期待して適用される場合がある．表面被覆材料には有機系，無機系，有機無機複合型などさまざまな種類の材料があるため，各機関が定めている表面被覆材料の規格などを参考にして選定するとよい．

ⅱ)含浸材塗布(表面含浸工)

表 3.1.4-1 の「劣化因子の遮断」の欄に示されていない工法であるが、コンクリート表層部の組織を改質することにより表面からの CO_2，H_2O，O_2 などの鋼材に対する腐食性物質の侵入を防止する工法が開発されており，潜伏期から進展期に適用されている．使用される表面含浸材としては，浸透性吸水防止材，浸透性固化材，表面改質材，ポリマー含浸材などがある．なお、表面含浸工の詳細については，「表面保護工法設計施工指針（案）」【工種別マニュアル編】（土木学会）を参考にするのがよい．

ⅲ)ひび割れ補修

ひび割れからの CO_2，H_2O，O_2 などの鋼材に対する腐食性物質の侵入防止を目的とする工法であり，主にひび割れの発生する進展期から加速期に適用される．ひび割れ補修工法は，注入工法と充てん工法に大別されるが，0.5㎜ 以上の比較的大きな幅のひび割れの補修には，充てん工法が適している．また，ひび割れ補修材料には有機系と無機系があるが，ひび割れに動きがある場合には有機系材料を使用するのが望ましい．

2)劣化速度の抑制

ⅰ)含浸材塗布

劣化速度の抑制を目的とする含浸材塗布工法に使用される材料として，アルカリ性付与材，塗布型防錆材などがある．

アルカリ性付与材は，コンクリート表面より含浸させることによりコンクリートのアルカリ性を回復させ，鋼材の腐食環境を改善する目的で使用される含浸材である．また，塗布型防錆材は，コンクリート表面より含浸させることによりコンクリートの内部から鋼材の腐食環境を改善する目的で使用される含浸材である．

3)劣化因子の除去

ⅰ)再アルカリ化

中性化したコンクリートの再アルカリ化および鋼材の不動態化を目的とする工法であり，潜伏期から劣化期にかけて広く適用できる．

仮設鋼材による外部電極とコンクリート中の鋼材との間に直流電流を流すことによりアルカリ性溶液をコンクリート中に強制浸透させ，アルカリ性を回復させる工法であり，電流密度は 1.0A/㎡ が標準レベルで，通電期間は１週間程度である．

ⅱ)断面修復

鋼材腐食によりひび割れや浮きを生じたコンクリートおよび内部の中性化したコンクリートを部分的にはつり取り，断面修復材により修復する工法であり，進展期から劣化期にかけて適用される．断面修復工法には，左官工法，吹付け工法，充てん工法などがあり修復範囲や部位，施工条件などを考慮して，適切な修復材料および施工法を選定する必要がある．

4)耐荷力，変形性能の改善

ⅰ)補強

補強工法は，腐食に伴う鋼材断面積の減少により低下した構造物や部材の耐荷性能（曲げ耐力，せん断耐力，剛性，変形性能など）を所要のレベルまで向上させることを目的とする工法であり，主に劣化期の構造物に対して適用されることが多い．

補強工法としては，コンクリート増厚工法，各種巻立て工法（FRP シート，鋼板，PC パネルなど），各種接着工法（FRP シート，鋼板など），外ケーブル工法などがある．また，桁や壁の増設，支持点の増設なども補強工法に分類される．補強工法の選定にあたっては，構造物および部材の要求性能を十分検討，評価して適切な工法を適用することが重要である．

ⅱ)打換え

鋼材腐食による断面欠損やコンクリートの損傷が著しい場合には，費用対効果を考慮して，部材の打換え工法が選択される場合がある．打換え工法の実施にあたっては，所要の性能を満足できる材料，施工方法の検討はもとより，施工中の通行規制などの供用状況を含めた施工条件を十分に考慮して計画することが重要である．

表 3.1.4-1 に基づく具体的工法の選定手順であるが，当表は，要求性能と劣化進行過程の２つの要素による工法選定表であるため，対策工の工法選定方針を示すものである．従って，具体的工法の選定については以下の内容を考慮し，使用する材料を含めて選定する必要がある．

（環境について）
- ・直射日光を受ける．
- ・直接風雨にさらされる．
- ・水分の供給がある．（橋台など）
- ・二酸化炭素(排気ガス)の影響を受ける可能性がある．（地覆や高欄など）

（状態について）
- ・漏水を伴っている．
- ・常時湿潤状態にある．
- ・振動の影響を受ける．（床版など）

（対策工の方向について）
- ・対策工を実施する方向に作業空間が確保できないなど作業方向が限定される．

例えば，床版の上下面から対策を実施すべきであるが，交通を停止できないため下面からのみの施工となる場合や沓座近傍の床版のように作業空間が確保できない場合などが考えられる．

また，基本的に橋梁構造物は，構築と同時に空気中に曝されるため，中性化による劣化を受ける環境にある．よって，劣化要因が中性化単独の場合の他，他の劣化要因が主たる原因である場合においても，中性化との複合作用にとなる場合が多く発生すると考えられるため，その点についても考慮が必要である．

なお，**表 3.1.4-1** の適用性欄の◎，○，△の記号であるが，絶対的なものでは無く該当する工法が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，適正な工法を選定することが大切である．

延命化対策工選定システムに関しても，**表 3.1.4-1** を基本として選定フローが組立てられているため，前述の内容を考慮した上での具体的工法の選定が重要である．

具体的工法としては，補修・補強に関する指針及び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，表 3.1.4−2 に示す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 3.1.4−1　中性化に対する補修.補強工法の選定

要求性能	潜伏期		進展期		加速期		劣化期	
	適用性	工　法	適用性	工　法	適用性	工　法	適用性	工　法
劣化因子の遮断	◎	表面被覆 （表面からのCO_2などの侵入防止）	◎	表面被覆 （表面からのCO_2, H_2O, O_2などの腐食性物質の侵入防止）	△	表面被覆 （表面からのCO_2, H_2O, O_2といった腐食性物質の侵入防止）	△	表面被覆 （剥落防止）
		—	◎	ひび割れ補修 （ひび割れからのCO_2, H_2O, O_2などの腐食性物質の侵入防止）	△	ひび割れ補修 （ひび割れからのCO_2, H_2O, O_2などの腐食性物質の侵入防止）	△	ひび割れ補修 （ひび割れからのCO_2, H_2O, O_2などの腐食性物質の侵入防止）
劣化速度の抑制	◎	含浸材塗布 （予防保全：鉄筋の不動態被膜の保護）	◎	含浸材塗布 （限界値を超えたアルカリ濃度の低下に対し，鉄筋の不動態被膜の再生）	△	含浸材塗布 （限界値を超えたアルカリ濃度の低下に対し，鉄筋の不動態被膜の再生）	△	含浸材塗布 （限界値を超えたアルカリ濃度の低下に対し，鉄筋の不動態被膜の再生）
劣化因子の除去	○	再アルカリ化 （限界値を超えたアルカリ濃度低下部のアルカリ性回復）	○	再アルカリ化 （限界値を超えたアルカリ濃度低下部のアルカリ性回復）	◎	断面修復 （限界値を超えたアルカリ濃度低下部のアルカリ性回復）	◎	断面修復 （限界値を超えたアルカリ濃度低下部のアルカリ性回復）
		—	○	断面修復 （限界値を超えたアルカリ濃度低下部のアルカリ性回復）	○	再アルカリ化 （限界値を超えたアルカリ濃度低下部のアルカリ性回復）	○	再アルカリ化 （限界値を超えたアルカリ濃度低下部のアルカリ性回復）
耐荷力，変形性能の改善		—		—		—	◎	補強 （FRP・鋼板接着や巻立てなど）
		—		—		—	○	打換え （劣化した部材のコンクリートによる打換え）
工法選定の理由（要求性能）	ひび割れは発生していない。鉄筋近傍では，腐食発生値までアルカリ性が低下しているので，これ以上の劣化因子の遮断，劣化速度の抑制を優先的に検討する。		鉄筋腐食が始まり，最終的には腐食ひび割れに至る段階。鉄筋腐食を促す劣化因子の遮断，劣化速度の抑制を図るとともに，鉄筋腐食の進行が進みひび割れを生じたぜい弱部については，その除去も検討する。		腐食ひび割れが発生したあと，急速に腐食が進行する段階。ひび割れ，浮きを生じたコンクリートの除去と共に，かぶりコンクリート片の剥落により第三者への影響が懸念される箇所については，剥落防止を検討する。		鉄筋の腐食に伴う断面積の減少により部材の耐荷力の低下が懸念される段階。劣化した部分の断面修復，剥落防止と共に，部材の耐荷性が懸念される箇所については，補強工も検討する。	

（注）記号は以下の意味をもつ
◎：主工法として適用すべき工法
○：主工法に次いで適用性の高い工法
△：構造物の劣化状況等に応じて適用を検討する工法

出典：「コンクリート診断技術'05（基礎編）　(社)日本コンクリート工

表3.1.4-2 研究会参加企業提供技術（中性化に対応する工法）

技術資料番号	技術名称	副題
2	ASフォーム工法	レジンコンクリートパネルによる表面保護工法
5	CS-21工法	コンクリート改質剤
6	HiPer CF工法	緩衝材を用いた炭素繊維シート接着工法
12	TDRショット工法	硬化促進剤を用いた新しいコンセプトの湿式吹付け工法
13	TRUMP system	下弦ケーブルを用いた有ヒンジラーメン橋のたわみ抑止･回復対策工法
14	TWS工法	ウレタン高圧注入漏水止水工法
16	アラミド繊維シート補強工法	
17	ｳｫｰﾀｰジェットはつり工法を用いた大規模断面修復技術	
19	エバーコン	表面被覆工法
20	かみ合わせ鋼板巻立て工法	かみ合わせ継手を用いた無溶接型機械式鋼板巻立て工法
22	コリジョンジェット工法	コンクリートのはつり深さを高精度で制御できるウォータージェット
23	コロイダルシリカ	含浸性表面改質材
24	ジョッツ･クリート工法	液体急結剤を使用したポリマーセメントモルタル系断面修復工法
26	スムースボード工法	高靭性セメントボードを使用したコンクリート耐久性向上工法
28	ソルシャット工法	異なった材料の積層化による表面被覆工法
31	ハイブリッドシート工法	特殊ラミネートシートを用いたはく落対策工法
32	ピングラウト工法	発泡ウレタン注入による止水工法
35	リフレッシュシャワー工法	含浸防水材を用いた床版防水工法
37	犠牲陽極材「ガルバシールドF」	
39	浸透性吸水防止材「マジカルリペラー」	コンクリートの耐久性を向上させる表面保護材料
40	吹付けモルタルによる耐震補強工法	薄い断面増加でRC断面増し厚工法と同程度の補強可能
41	繊維補強超速硬コンクリート補修工法	
43	炭素繊維シート補強工法	炭素繊維シートを用いたＲＣ構造物の補修･補強工法
45	脈動ひび割れ注入工法	
46	無機系封孔剤	
47	アイゾールEX工法	撥水･表面防水･浸透防水のトリプル効果をもつ透湿性被膜が、コンクリートの劣化を抑制する。
	合計 26技術	

3.1.5 凍害への対応策

(1) 対応策の要求性能

凍害への対応策として補修･補強を行う場合には，補修･補強に期待する効果を明確にする必要がある．

凍害は，コンクリート中の水分の凍結と融解の繰返しによって，ひび割れやポップアウトなどが生じ，コンクリートが徐々に劣化する現象である[1)]．このような劣化が進行することによって，かぶりコンクリートのはく落やコンクリート中の鋼材の腐食に至る．また，劣化の進行初期や劣化程度が軽微な場合には，コンクリート表面に微細なひび割れが発生していることもある．したがって，対応策に期待する効果としては，コンクリートに外部から水分が供給されないようにすることや，ひび割れ部分からの水の侵入を防止するためにひび割れの変動や拡大に対する追従性，はく落抵抗性および対応策に使われる材料自体の凍結融解抵抗性があげられる．

(2) 要求性能の評価方法

要求される性能が長期的に満足なものか否かを評価するためには，凍害に対する対策工の劣化予測を行うことや，促進試験で将来の状態を推定する方法が考えられるが，両者とも確立された方法はないのが現状である．したがって，長期的な性能を確認するためには，構造物が置かれる環境に対する暴露試験結果などを参考にするとよい．

a) しゃ水性

「表面保護工法設計施工指針（案）」[2)]では，表面被覆工法に用いられる表面被覆材のしゃ水性の試験は土木学会規準の試験方法であるJSCE-K523「表面被覆材の透水量試験方法（案）」によることが示されている．また，本試験における評価基準値としては「0.2g以下」とされている．この方法では，表面保護システムを適用したコンクリートの一定水圧下における透水量を評価項目としたものである．また，水分の透水ではなく塩化物イオンの透過性の評価を水分の透過性の評価に用いるとの観点から，JSCE-K524「表面被覆材の塩化物イオンの浸透深さ試験方法（案）」によることも選択肢の一つになる．本試験における評価基準値は「発色しないこと」であり，塩化物イオンが浸透しないことになる．

b) ひび割れ追従性

土木学会の「表面保護工法設施工指針（案）2005」では，表面被覆工法に用いられる表面被覆材のひび割れ追従性の試験は土木学会規準の試験方法であるJSCE-K532「表面被覆材のひび割れ追従性試験方法」によることが示されている．この試験方法には，-20±3℃の低温での試験も示されており，低温におけるひび割れ追従性の評価ができる．本試験による評価基準値は要求される追従性のタイプごとに定められており，使用する状況ごとに参照するとよい．

c) 凍結融解抵抗性

コンクリートの凍結融解抵抗性試験方法として一般的な JIS A 1148「コンクリートの凍結融解試験方法」を断面修復材の試験にも用い，相対動弾性係数や質量減少で評価する．「コンクリート標準示方書［維持管理編］」[11)]では，重要構造物の場合，相対動弾性係数を 95%以上に設定するなどの場合もあるとしている．また，表面被覆材などと断面修復材を併用する場合は，それらが一体となった対策工として評価することも考慮する．

(3) 要求性能に応じた対策工と具体的工法

凍害の対策としては，凍害の主原因である水の供給の抑制，劣化した部分の撤去が考えられる．さらに劣化が進行した場合は耐荷力の向上も視野に入れた対策が必要となる．凍害による劣化は，コンクリート自体の劣化が主となるため，凍害を受けたコンクリートの物性値は大きく低下している場合が多い．そのため，劣化の要因にもよるが，水の供給を防ぎ，基本的に凍害を受けた箇所を取り替える対策が有効である．対策時期としては，構造物ができるだけ乾燥していることが望ましい．また，劣化の程度によっても選択する工法は異なるのが一般的である．当然ながら劣化の初期段階で対策を講じた方が簡単な対策ですむ場合が多い．

なお，凍害の場合，対策実施後には既存のコンクリートの品質よりも，補修材料の品質により凍害の進行速度は異なることが考えられる．したがって，補修材料の耐凍害性について十分に検討する必要がある。

表 3.1.5-1 に要求性能に対する対策工法を示す．この表は，補修・補強に対する要求性能を縦軸として，a)劣化因子の遮断，b)劣化速度の抑制，c)劣化因子の除去，d)耐荷力，変形性能の改善に大別し，横軸に潜伏期，進展期，加速期，劣化期の４つの劣化過程を示すことにより，適用される補修・補強工法を取りまとめたものである．

a)劣化因子の遮断

①表面被覆工

外部からの水分供給を遮断することを目的とした工法であり，潜伏期から加速期にかけて広く適用さ

れる．表面被覆工は，一般にプライマー塗布，下地調整，中塗り，上塗りなどの工程を重ね膜厚を増すことによって，劣化因子のコンクリート内部への浸透を阻止し遮断を図るものである．表面被覆材は，有機系と無機系に分類されさまざまな種類の材料があるため，各機関が定めている表面被覆材の品質基準あるいは規格などを参考にして選定するとよい．

②表面含浸処理工

コンクリート表面に含浸材を塗布することによって，劣化因子の浸入または鉄筋の腐食を抑制するのに用いられる工法である．

含浸材としては，浸透性撥水防止材，浸透性固化材，表面改質材，ポリマー含浸材，防鎖含浸材等がある．一般的には，浸透性撥水防止材（シリコーン系，アクリル系，ウレタン系等）が用いられている．しかし，最近においては，浸透性固化材や表面改質材等の中にも防水性能を備えたものが出てきており，含浸材の選定にあたっては施工条件等を充分に検討する必要がある．

③ひび割れ補修

ひび割れからの水分の浸入を防止や耐荷性の回復を目的とした工法で，主にひび割れの発生する進展期に適応されるが，加速期，劣化期においても構造物の劣化状況応じて適応が可能な工法である．

ひび割れ注入工法は，放水性および耐荷性の回復対して汎用性があり幅広く用いられている．注入材料としては，有機系のエポキシ樹脂やアクリル樹脂等と無機系のセメント系，ポリマーセメント系がある．

また，注入方法として自動式低速低圧注入工法，手動式樹脂注入工法，機械式樹脂注入工法がある．従来は，後者の２工法が用いられていたが，1)注入量の管理が可能である．2)注入精度が作業員の熟練度に左右されない．3)ひび割れ深部の幅が 0.05mm と狭い場合でも確実に注入できる等の理由から自動式低圧注入工法が主流となっている．

一方，ひび割れ充てん工は，ひび割れ幅 0.5mm 以上の比較的大きなものに対して適する工法で，注入工と同様にウレタン樹脂，シリコーン樹脂，エポキシ樹脂等の有機系材料と無機系材料とがある．これらの材料をひび割れに沿ってカットしたコンクリート部分に充てんを行ない補修する方法である．

施工手順として水を注入して湿潤状態に保っ後に、注入材を注入しなければならない場合がある．この様な場合，修復後新たな凍害を誘発する可能性を残すため留意する必要がある．

b)劣化速度の抑制

①表面被覆工

②表面含浸処理工

③ひび割れ補修

以上，a)劣化因子の遮断の項を参照

c)劣化因子の除去

①断面修復工

凍害により発生した，ポップアウトやスケーリング等のコンクリートの劣化部分をはつり取り，断面修復材により修復する工法である．断面修復工法としては，左官工法，吹付け工法，充てん工法，埋設型枠工法などが挙げられる．

断面修復材として持つべき特性は，修復する部材や構造物が置かれている環境条件，施工方法等により多種多様となるが下記の項目が考えられる．

1) 高い凍結融解抵抗性を持つ
2) 既設コンクリートと設計強度が同等以上である
3) 熱膨張係数，弾性係数等が既設コンクリートと同等以上である
4) 乾燥収縮が小さく，接着性が高い
5) 作業性がよい

d)耐荷力，変形性能の改善

①補強

補強工法は，凍害の劣化過程における断面欠損や鉄筋の腐食を伴う断面欠損により，低下した構造物の耐荷性能を所要のレベルまで向上させることを目的としている．

補強工法としては，コンクリート断面の増加（増厚工法，RC 巻立工法，下面増厚工法，上面増厚工法），部材の追加（桁増設工法，壁増設工法），支持点の追加，
補強材の追加（接着工法，巻立て工法）などがある．

補強工法は，主に劣化期の構造物に対して適用されることが多い．工法の選定にあたっては，構造物の要求性能を十分検討，評価して適切な工法を適用することが重要である．

②打換え

打換え工法は，一般に接着工法や増厚工法などが適用できない劣化の著しい構造物を対象とし，道路橋床版などに多く見られる．打換え工法の対象となるのは，部材の劣化の著しい箇所や部材全体となる．このため，施工にあたっては，大規模な交通規制を伴うことも想定されるので，構造物の供用状況や施工条件などを十分考慮して計画する必要がある．

なお，**表 3.1.5-1** の摘要性欄の◎，○，△の記号は，当該工法の一般的な適用性について示したものであり，絶対的な評価という意味ではないことに注意が必要である．**表 3.1.5-1** に基づく具体的工法の

選定手順であるが，当表は，要求性能と劣化過程の２つの要素による工法選定表であるため，対策工の工法選定方針を示すものである．したがって，具体的工法の選定については以下の内容を考慮し、使用する材料を含めて選定する必要がある．

（コンクリートについて）
・セメント，骨材，細骨材などの種類
・単位セメント量，水セメント比，空気量等の配合
・コンクリートの打込み，締め固め，養生方法
・防水仕様，断熱仕様
・部位，形状

（環境について）
・最低気温，日射量，風速，降水量，
・凍結融解繰返し回数
・構造物の方位

（水の供給について）
・供給源：雨，雪，川水，海水，湧水等
・供給形態：水の供給を直接受ける
　　コンクリート表面を伝わってくる
　　ひび割れなどの欠陥部を経由してくる
　　飛来によって供給される等

(施工条件)
・高さ制約，施工時期，作業時間，交通量

凍害による劣化原因は，コンクリート内部の水分の凍結融解の繰返しが主なものであることから，コンクリートをある程度の乾燥状態に保つ，あるいは表面仕上げ，防水材などで外部からの水分の補給を遮断することが，凍害に対して有効な対処法となる．したがって，選定にあたっては，構造物のおかれた環境や諸条件と要求性能および劣化の状態を十分に考慮すること必要がある．

また，延命化対策工選定システムは，**表 3.1.5-1** を基本として構築されたものであり，本システムを活用し具体的工法を選定するにあたっては，同様に十分に考慮する必要がある．

具体的工法としては，補修・補強に関する指針及びマニュアル等に掲載されている各工法を収集する

表　3.1.5-1　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
劣化因子の遮断 劣化速度の抑制	◎	表面被覆・表面含浸処理（表面からの水分の侵入防止）	◎	表面被覆（表面からの水分の侵入防止）	△	表面被覆（表面からの水分の侵入の防止，および剥落防止）	△	表面被覆（表面からの水分の侵入の防止，および剥落防止）
			◎	ひび割れ補修（ひび割れからの水分の侵入防止）	△	ひび割れ補修（ひび割れからの水分の侵入防止）	△	ひび割れ補修（ひび割れからの水分の侵入防止）
劣化因子の除去			○	断面修復（スケーリングやポップアウト部の除去と断面の修復）	◎	断面修復（スケーリングや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（スケーリングや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・鋼板接着や巻立てなど）
							○	打換え（劣化した部材のコンクリートによる打換え）
工法選定の理由（要求性能）	凍害深さが小さく剛性変化や鉄筋の腐食がない。凍害を受ける地域のため表面被覆や表面含浸処理などの工法が検討対象となる。		凍害深さが大きくなり鉄筋腐食が始まる段階。表面からの水分の侵入を防ぐ工法が優先されるが，スケーリングやポップアウトがある場合には，断面修復を併用する必要がある。		スケーリング，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，比較的広い範囲のコンクリートの除去と断面の修復が優先される。特に劣化が激しい部分では補強も考慮に入れる必要がある。		鉄筋の腐食に伴う断面減少により部材の耐荷力の低下が懸念される段階。劣化した部分の断面修復と共に，部材の耐荷性が懸念される箇所については，補強や打換え工を検討する必要がある。	

とともに，表 3.1.5−2 に示す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3.1.5-2 研究会参加企業提供技術（凍害に対応する工法）

技術資料番号	技術名称	副題
2	ASフォーム工法	レジンコンクリートパネルによる表面保護工法
5	CS-21工法	コンクリート改質剤
6	HiPer CF工法	緩衝材を用いた炭素繊維シート接着工法
12	TDRショット工法	硬化促進剤を用いた新しいコンセプトの湿式吹付け工法
13	TRUMP system	下弦ケーブルを用いた有ヒンジラーメン橋のたわみ抑止･回復対策工法
14	TWS工法	ウレタン高圧注入漏水止水工法
16	アラミド繊維シート補強工法	
17	ｳｫｰﾀｰジェットはつり工法を用いた大規模断面修復技術	
20	かみ合わせ鋼板巻立て工法	かみ合わせ継手を用いた無溶接型機械式鋼板巻立て工法
22	コリジョンジェット工法	コンクリートのはつり深さを高精度で制御できるウォータージェット
23	コロイダルシリカ	含浸性表面改質材
24	ジョッツ･クリート工法	液体急結剤を使用したポリマーセメントモルタル系断面修復工法
26	スムースボード工法	高靭性セメントボードを使用したコンクリート耐久性向上工法
28	ソルシャット工法	異なった材料の積層化による表面被覆工法
35	リフレッシュシャワー工法	含浸防水材を用いた床版防水工法
39	浸透性吸水防止材「マジカルリペラー」	コンクリートの耐久性を向上させる表面保護材料
46	無機系封孔剤	
48	PICフォーム	ポリマー含浸コンクリート製埋設型枠による耐久性向上技術
	合計 18技術	

3.1.6 化学的侵食への対応策

(1) 対応策の要求性能

化学的侵食に至る要因は，酸類，アルカリ類，塩類，油類，腐食性ガスなど多岐にわたり，その劣化状況も一様ではない．従って，化学的侵食への対応策として補修･補強を行う場合には，補修･補強に期待する効果を明確にする必要がある．

化学的侵食による劣化は，コンクリート中へ侵入した化学物質によるコンクリートの劣化や鉄筋の腐食膨張により進行する．このため，対応策に期待する効果としては，コンクリートに劣化を及ぼす化学物質をコンクリートに接触させない対策が主となるが，実際には完全に化学物質を遮断することは難しい．また，他の対応策として，既にコンクリート中に侵入した化学物質を除去すること，ひび割れからの腐食性物質の侵入防止すること，化学的侵食により低下した耐荷力を回復させることなどがあげられる．

(2) 要求性能の評価方法

a) 劣化因子の遮断（表面からの腐食性物質の侵入防止）

化学的侵食による劣化を引き起こす因子がコンクリート中へ侵入するのを遮断するためには，表面からの腐食性物質の侵入を抑制すること目的として，ひび割れ部の補修やコンクリート表面の被覆を行う．化学的侵食環境にさらされるコンクリート構造物の劣化を長期間完全に防止することは現状では難しいが，次のような考え方で対処するとよい．

① 構造物の耐用年数を設定して，その機能を保持する．
② 定期的な補修を行う．
③ ①および②の併用による対策を選定する．

表面被覆材を選定する際には，該当する化学物質を用いた浸漬試験や適用する環境条件に近い条件での暴露試験の結果あるいはこれまでの実積などにより，表面被覆材自体の化学抵抗性や化学物質の遮断性を確認しておく必要がある．

表面被覆工の施工時においては，部分的破壊試験により塗膜厚さや付着性を評価しておくとよい．また，供用後においては，表面被覆材料の経年劣化を確認するために被覆層の割れ･剥離の有無，光沢･色差の計測，遮水性能の持続性等を確認する．必要に応じて部分的破壊試験（コア採取など）を行い，化学的侵食因子の浸透の有無を確認する．また，供用時には補修部の損傷や塗膜の膨れなどの発生も考えられるため，定期的な点検と対策の実施が望ましい．

化学的侵食劣化因子の遮断を目的としたひび割れ補修では，施工直後および長期的観点から補修効果を確認することは必ずしも容易ではない．このため，必要に応じて部分的破壊試験（コア採取など）による評価を行うのがよい．

表面被覆材の性能評価の詳細については，「表面保護工法設計施工指針（案）および同［工種別マニュアル編］」[2)]を参考にするのがよい．

b) 劣化速度の抑制（ひび割れからの腐食性物質の侵入防止）

コンクリート構造物にひび割れが生じている場合，腐食性物質が浸入し，劣化しやすい状況となる．このため，化学的侵食速度の抑制を目的として，ひび割れ補修を行うが，構造物の劣化状況等に応じて適用を検討する．ひび割れ補修材料は，該当する化学物質に対する抵抗性を有するものを選定する必要があるため，選定の際には，該当する化学物質を用いた浸漬試験や適用する環境条件に近い条件での暴露試験の結果あるいはこれまでの実積などにより，ひび割れ補修材料の化学抵抗性や腐食性物質の侵入抑制効果を確認しておく必要がある．

c) 劣化因子の除去（劣化部分の除去と断面修復）

コンクリートの腐食深さが 1cm 以上となった場合は，腐食領域のコンクリートの除去が要求される．断面修復は，化学的侵食因子により腐食したコンクリートをはつり除去した後に，鉄筋をアルカリ性の新しい材料で保護することによって不動態化させる方法である．

一般に，断面修復材料には，モルタルやコンクリート系の材料が用いられるが，これらの材料では，腐食因子の遮断に大きな効果は期待できないため，表面被覆との併用が基本となる．レジンコンクリートや成分調整を行った耐酸セメントなどでは，腐食因子を抑制する効果が認められるものもある．いずれにしても，断面修復材を選定する際にも，該当する化学物質を用いた浸漬試験や適用する環境条件に近い条件での暴露試験の結果あるいはこれまでの実積などにより，断面修復材自体の化学抵抗性や化学物質の遮断性を確認しておく必要がある．

また，断面修復工では，既設コンクリートと断面修復材との一体性が要求されることから，既設コンクリートや鉄筋に必要以上のダメージを与えないはつり除去方法の選択や，修復材料の性能評価（付着性能，ひび割れ抵抗性能など）を行う必要がある．修復材料の性能評価の詳細については，「表面保護工法設計施工指針（案）および同【工種別マニュア

ル編】」[2]や「吹付けコンクリート指針（案）［補修･補強編］」[3]等を参考にするのがよい．

d) 耐荷力･変形性能の改善

化学的侵食劣化を受けたコンクリートは，劣化が進行すると鉄筋が露出している場合もあり，必要に応じて補強を検討する必要がある．劣化が大規模な場合は打換えを行う．

耐荷力を向上させる方法としては，FRP･鋼板接着，外ケーブル補強，増厚･巻立て等，構造形式や損傷程度などによって適切に選定する必要がある．各種の補強工法に対する評価は，補強設計によって行うとともに，必要に応じて実験や解析によって照査する．また，対応策を実施した後は，鉄筋やコンクリートのひずみ計測，静的載荷によるたわみ測定，動的載荷による振動特性測定などにより，耐荷力･変形性能を評価することもできる．

(3) 要求性能に応じた対策工と具体的工法

化学的侵食により性能低下した構造物に対する補修・補強は，期待する効果や劣化状態に応じて**表 3.1.6-1** に示される工法の中から選定されるのが一般的である．

表 3.1.6-1 は，補修・補強に対する要求性能を縦軸として，1)劣化因子の遮断，劣化速度の抑制，2)劣化因子の除去，3)耐荷力，変形性能の改善に大別し，横軸に劣化の進行過程を示すことにより，適用される補修・補強工法を取りまとめたものである．なお，**表 3.1.6-1** に示す要求性能は，前述の(2)要求性能の評価方法に示される a)～d)の各要求性能と，おおよそ以下のように対応していると考えてよい．

a)化学的侵食の進行を抑制→劣化因子の遮断
b)化学的侵食の深さを 0 にする→劣化因子の除去
c)鉄筋の腐食進行を抑制→劣化速度の抑制
d)耐荷力を向上→耐荷力，変形性能の改善

1)劣化因子の遮断，劣化速度の抑制

①表面被覆

表面被覆工法は，既設コンクリート表面に塗装材料などを用いて新たな保護層を設け，コンクリート内部への腐食性物質（劣化因子）の侵入を防止することを目的とした工法である．

一般に，プライマー塗布，下地調整，中塗り，上塗りなどの複数の工程で実施され，潜伏期から劣化期まで幅広く適用される．

表面被覆材料に要求される性能は多くの場合に耐薬品性であり，各機関が定めている表面被覆材料の規格などを参考にして選定するとよい．たとえば，日本下水道事業団『防食指針』に規定されている防食材料がそれに当たる．

一般の表面被覆の手順に関しては，主に塗装工法，パネル取付け工法，埋設型枠工法に分類される．ただし，　化学的侵食を防止する目的で表面被覆工法を適用する場合には，表面被覆材料自体の耐久性（寿命）が優れていても，それがコンクリート構造物の全面を被覆していない工法（パネル取付け工法，埋設型枠工法）であれば，材料をつなぐジョイントやシーリング部分が侵食されることのないように，細部にわたって防食材料とするよう十分検討することが重要である．

②ひび割れ補修

ひび割れ補修工法は，既設コンクリート躯体に発生したひび割れを塞ぎ，コンクリート内部への腐食性物質（劣化因子）の侵入を防止することを目的とした工法である．

その種類には，表面塗布工法，注入工法，充填工法などがあり，ひび割れ幅の大小，ひび割れの変動の大小などによって使い分けられており，進展期から劣化期まで幅広く適用される．

しかしながら，ひび割れ補修単独での適用は少なく，表面被覆工法などの他工法との併用で適用される．あくまでも主体は表面被覆であり，ひび割れ補修は表面被覆を突破された段階でひび割れを介して劣化因子が容易に内部に侵入しないように防ぐものである．

2)劣化因子の除去

①断面修復

断面修復工法は，既設コンクリート構造物が劣化により元の断面を欠損した場合の修復や，劣化因子を含むかぶりコンクリートを撤去した場合に健全な材料で断面を再生することを目的とした工法である．

断面修復工法は，一般にプライマーあるいは鉄筋防錆材などの下塗りと，断面修復材による欠損部充填の２工程に分けられ，施工条件により左官工法，吹付け工法，プレパックドコンクリート工法のどれかで実施される．

ただし，進展期までは表面被覆が主工法であり，加速期以降に主工法となる．

断面修復材料の種類は，プライマーおよび鉄筋防錆材と断面修復材に大別される．

プライマーに要求される性能は多くの場合に健全部分として残された既存コンクリートとの接着性であり，エポキシ樹脂やアクリル系などの有機系材料がそれに相当する．また，かぶりコンクリートが欠損した状態で鉄筋が露出する場合には，防錆効果の

あるリン酸，有機酸，キレート化剤などを配合した塗料を鉄筋に塗布する．

化学的侵食により性能低下した構造物に対する補修用の断面修復材には，セメント系であっても耐酸性を有する製品が一部で開発されているものの，ポリマーセメント系より樹脂モルタルが適している．なお，断面修復を適用した場合でも，その後の表面被覆によって再劣化を防止することが一般的である．

3)耐荷力，変形性能の改善

①補強

補強工法は，既設コンクリート部材の表面に，鋼板や FRP シートなどを接着したり，巻立てることで部材の耐力や変形性能などを向上させることを目的とした工法であり，劣化期に移行してから主工法として適用すべきものである．

とくに，化学的侵食により性能低下した構造物を補強する場合には，FRP のように耐薬品性に優れた材料での補強が不可欠であり，耐力や変形性能のような力学的性能の向上以外にも，劣化の抑制に大いに効果をもたらす．

なお，補強を適用した場合でも，その後の表面被覆によって再劣化を防止することが一般的である．

②打換え

打換え工法は，既設コンクリート部材の欠損部分を断面修復するレベルでは済まないような規模で，欠損部分を含めた損傷の著しい部分のみ，あるいは全体を撤去して再度新しいコンクリートで打換える工法であり，初期の竣工時と変わらない耐力や変形性能を回復させる工法である．主に劣化期に入ってから採用する工法であり，補強工法の次に適用性の高い工法である．

ただし，既設コンクリート構造物として外力が働いていたり荷重が載荷されている場合などでは，打換え工法以前に補助工法が必要となるため，補強工法などの自重が大きくなるような工法が不適当な場合でないと，主工法とはなり得ない．

なお，打換えを適用した場合でも，その後の表面被覆によって再劣化を防止することが一般的である．

なお，**表 3.1.6-1** の適用性欄の◎，○，△の記号であるが，絶対的なものではなく該当する工法が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，適正な工法を選定することが大切である．

当表は，要求性能と劣化進行過程の２つの要素による工法選定表であるため，対策工の工法選定方針を示すものである．

したがって，具体的工法の選定については以下の内容を考慮し，使用する材料を含めて選定する必要がある．

（環境について）
- ・化学物質が気体状であるか，液体状であるか．
- ・水分の供給がある．

（状態について）
- ・漏水を伴っている．
- ・常時湿潤状態にある．
- ・振動の影響を受ける．（床版等）

（対策工の方向について）
- ・対策工を実施する方向に作業空間が確保できない等作業方向が限定される．

化学的侵食に対するに対策工は，表面被覆工により腐食性物質（劣化因子）とコンクリートの接触を遮断することが基本となる．その上で，劣化程度に応じて断面修復や補強などの対策を行うことが必要である．

また，補修・補強に関する指針及び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，表 3.1.6－2 に示す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．

参考文献

1) 日本コンクリート工学協会：コンクリートのひび割れ調査，補修･補強指針-2003-，2003．
2) 土木学会：コンクリートライブラリー119「表面保護工法 設計施工指針（案）および同【工種別マニュアル編】」，2005．
3) 土木学会：コンクリートライブラリー123「吹付けコンクリート指針（案）【補修･補強編】」，2005．
4) 土木学会：コンクリートライブラリー95「コンクリート構造物の補強指針（案）」，1999．
5) 土木学会：コンクリートライブラリー124「アルカリ骨材反応対策小委員会報告書」，2005.
6) 日本道路公団：コンクリート片はく落防止対策マニュアル，2000.（構造物施工管理要領 3-7 はく落防止.H16.4 に更新）
7) 日本道路公団：防水システム設計・施工マニュアル（案），2001.
8) 日本道路公団：設計要領第二集 橋梁保全編，1997.
9) 建設省土木研究所：炭素繊維シート接着工法による道路橋コンクリート部材の補修・補強に関する設計・施工指針（案），1999.
10) 国土交通省近畿地方整備局：橋梁床版上面増厚工法設計・施工マニュアル，1999.
11) 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.

表 3.1.6-1　化学的侵食に対する補修・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
劣化因子の遮断	◎	表面被覆（表面からの腐食性物質の侵入防止）	◎	表面被覆（表面からの腐食性物質の侵入防止）	◎	表面被覆（表面からの腐食性物質の侵入防止）	◎	表面被覆（表面からの腐食性物質の侵入防止）
劣化速度の抑制			△	ひび割れ補修（ひび割れからの腐食性物質の侵入防止）	△	ひび割れ補修（ひび割れからの腐食性物質の侵入防止）	△	ひび割れ補修（ひび割れからの腐食性物質の侵入防止）
劣化因子の除去			○	断面修復（劣化部分の除去と断面の修復）	◎	断面修復（劣化部分の除去と鉄筋の防食を目的とした断面修復）	◎	断面修復（劣化部分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・巻立てなど）
耐荷力，変形性能の改善							○	打換え（劣化した部材のコンクリートによる打換え）
工法選定の理由（要求性能）	腐食深さ数mm程度の表面的な段階の劣化現象の段階。 この段階では，内部まで劣化が進行していないので，劣化進行抑制を目的として，劣化外力に応じた表面被覆が検討対象となる。		腐食深さ1～3cm程度の劣化段階。ぜい弱化した層を除去して断面修復を行い，補修後の劣化進行を抑制するために，劣化外力に応じた表面被覆を行うことが考えられる。 断面修復厚さが薄いので，モルタル系材料の使用が基本となる。		粗骨材剥落までの劣化段階であり，鉄筋腐食の進行もある。劣化部の除去，鉄筋の錆落しの後，断面修復を行う。劣化外力に応じた表面被覆によって再劣化を防止することが考えられる。劣化の厚さやその補修規模に応じて，モルタル系材料またはコンクリートを選定する。		劣化が進行しており，鉄筋が露出している部分もある。劣化部の除去だけでなく，鉄筋の腐食進行を抑えることを目的とした断面修復や，必要に応じて補強を検討する必要がある。補修規模に応じて打換えも検討対象となる。併せて，劣化外力に応じた表面被覆も必要となる。

（注）記号は以下の意味をもつ
◎：主工法として適用すべき工法　　○：主工法に次いで適用性の高い工法
△：構造物の劣化状況等に応じて適用を検討する工法

出典：「コンクリート診断技術'03（基礎編）　(社)日本コンクリート工学協

表3.1.6-2 研究会参加企業提供技術（化学的侵食に対応する工法）

技術資料番号	技術名称	副題
2	ASフォーム工法	レジンコンクリートパネルによる表面保護工法
6	HiPer CF工法	緩衝材を用いた炭素繊維シート接着工法
17	ｳｫｰﾀｰｼﾞｪｯﾄはつり工法を用いた大規模断面修復技術	
20	かみ合わせ鋼板巻立て工法	かみ合わせ継手を用いた無溶接型機械式鋼板巻立て工法
22	コリジョンジェット工法	コンクリートのはつり深さを高精度で制御できるウォータージェット
24	ジョッツ･クリート工法	液体急結剤を使用したポリマーセメントモルタル系断面修復工法
26	スムースボード工法	高靭性セメントボードを使用したコンクリート耐久性向上工法
28	ソルシャット工法	異なった材料の積層化による表面被覆工法
29	チタングリッドによる電気防食工法	帯状陽極を用いたコンクリート構造物の電気防食
42	耐酸コンクリート工法	硫酸イオンに強い酸性河川･酸性地盤対応コンクリート
46	無機系封孔剤	
48	PICフォーム	ポリマー含浸コンクリート製埋設型枠による耐久性向上技術
	合計 12技術	

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 ＰＣ鋼材関連の損傷への対応策

(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構造物の耐荷力上で重要である．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：排出口での確認．注入量の確認
施工後：削孔による充填確認．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) 要求性能に応じた対策工と具体的工法

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構造物に対する補修・補強は，期待する効果や劣化程度に応じて**表3.2.1-1**に示される工法の中から選定されるのが一般的である．

ここでは，プレストレストコンクリート構造物特有の対策工法として，ＰＣ鋼材腐食の進行を抑制するグラウト再注入工法，ＰＣ鋼材定着部からの腐食因子の侵入を防止し，コンクリート剥落を防止する定着部防護工法，耐荷性能・変位性能の改善が可能な外ケーブル補強工法，電気防食工法や脱塩工法等の電気化学的工法のＰＣ構造物への適用について紹介する

他の具体的工法は，補修・補強に関する指針及び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，表3.2.1―2に示す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 3.2.1-1 ＰＣ鋼材関連の損傷に対する補修・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
劣化因子の遮断	◎	グラウト再注入（PC鋼材の腐食防止，付着性能の確保）	◎	グラウト再注入（PC鋼材の腐食防止および，付着性能の確保）	◎	グラウト再注入（PC鋼材の腐食防止および，付着性能の確保）	△	グラウト再注入（PC鋼材の腐食防止および，付着性能の確保）
	◎	橋面防水（橋面からのH_2O，CL^-などの腐食性物質の侵入防止）	◎	橋面防水（橋面からのH_2O，CL^-などの腐食性物質の侵入防止）	◎	橋面防水（橋面からのH_2O，CL^-などの腐食性物質の侵入防止）	◎	橋面防水（橋面からのH_2O，CL^-などの腐食性物質の侵入防止）
	○	表面保護（予防保全）	◎	表面保護（表面からのCL^-，O_2などの腐食性物質の侵入防止）	◎	表面保護（表面からの腐食性物質の侵入防止および，剥落防止）	△	表面保護（表面からの腐食性物質の侵入防止および，剥落防止）
		―	◎	ひび割れ補修（ひび割れからのH_2O，O_2などの腐食性物質の侵入防止）	◎	ひび割れ補修（ひび割れからのH_2O，O_2などの腐食性物質の侵入防止）	△	ひび割れ補修（ひび割れからのH_2O，O_2などの腐食性物質の侵入防止）
	○	定着部保護（予防保全）	◎	定着部保護（鋼材の腐食抑制および，突出防止）	◎	定着部保護（鋼材の腐食抑制および，突出防止）	◎	定着部保護（鋼材の腐食抑制および，突出防止）
劣化速度の抑制	○	電気防食（予防保全）	◎	電気防食（鉄筋腐食の進行の大幅な低減）	◎	電気防食（鉄筋腐食の進行の大幅な低減）		―
劣化因子の除去		―	○	電気化学的脱塩（限界値を超えた塩化物イオン量の低減）	◎	電気化学的脱塩（限界値を超えた塩化物イオン量の低減）		―
耐荷力、変位性能の改善		―		―	○	外ケーブル補強（プレストレスによる耐荷力の向上）	◎	外ケーブル補強（プレストレスによる耐荷力の向上）
		―		―	○	接着工法（炭素繊維，鋼板接着など）	◎	接着工法（炭素繊維，鋼板接着など）
		―		―	△	増厚工法（部材断面性能の向上）	○	増厚工法（部材断面性能の向上）
工法選定の理由(要求性能)	ひび割れなどの変状は発生していない．鋼材付近では塩化物イオン量が増加しているので，劣化因子の遮断を優先的に検討する．		鋼材腐食が継続的に発生し，ひび割れや定着部損傷に至る段階．劣化因子の遮断を確実に行う．必要に応じて，腐食の進展速度を抑制する工法を検討する．		ひび割れなどが発生以降，急速な腐食が進展する段階．鋼材腐食の進行を抑制する工法が優先される．必要に応じて，補強工法を併用する．		鋼材の腐食に伴う断面積の減少により部材の耐荷力の低下が懸念される段階．鋼材腐食速度の抑制や第三者被害の防止を検討するとともに，耐荷力の向上を図る補強工法も検討する．	

a. 劣化因子の遮断

① グラウト再注入工法

グラウトの充填が不十分な場合は，基本的にＰＣ鋼材の健全度を確認した上でグラウト再充填を行い，ＰＣ鋼材の腐食進行を抑制する．なお，再注入は事前に十分な調査を実施し，これをもとに**図3.2.1-1**に示すように削孔処理，注入口・排出口の設置，注入作業，あと処理に至るまでの再注入作業計画を立て，適切な機材，材料，施工方法を選定して確実に実施する．なお，グラウトの充填度に関する調査方法や再注入方法は，発注機関が独自にその仕様を定めていることが多く，適用に当っては当該発注機関と十分に協議を行う必要がある．[1)，2)] また削孔時にＰＣ鋼材に損傷を与えることが危惧されるため，削孔に当っては，シースや鋼材と接触することにより電気的に短絡し，削孔機械が自動停止するシステム等を採用し，ＰＣ鋼材近傍では，ドライバー等を用いた人力作業によるグラウトやＰＣ鋼材の腐食状況の確認が望まれる．**図3.2.1-2**には再注入の施工概要図を示す．

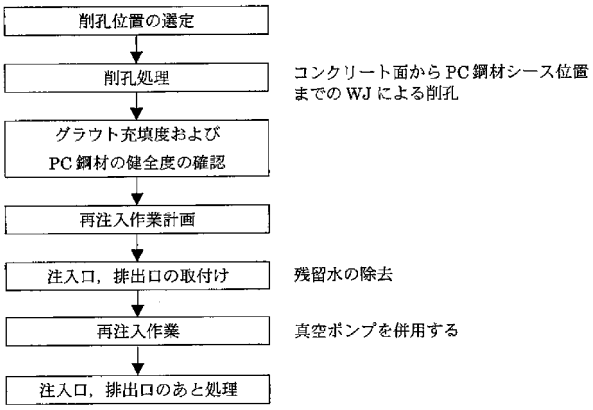


図3.2.1-1 ＰＣグラウト再注入の施工手順 [1)]

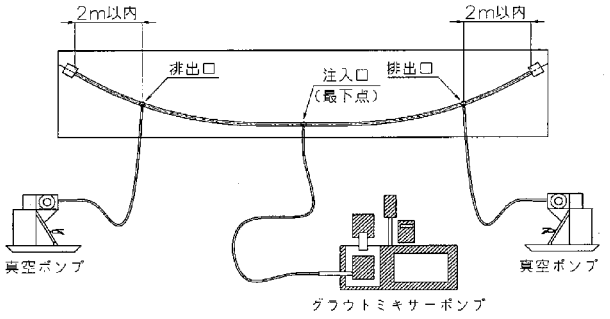


図3.2.1-2 ＰＣグラウト再注入の施工概要図 [1)]

② 定着部保護工法

ＰＣ鋼材の定着部においては，耐久性を確保するため，表面保護工法を実施することが望ましい．特に後埋め部にひび割れなどが発生した場合には劣化因子の侵入を遮断する必要がある．また，第三者被害の可能性が考えられる場合はＰＣ鋼材の破断による定着部のコンクリート片の剥落防止対策を兼ねることが可能である．

なお，表面保護工法およびＰＣ鋼材の破断による定着部のコンクリート片の剥落防止対策は発注機関が独自にその仕様を定めていることが多く，適用に当っては当該発注機関と十分に協議を行う必要がある．[2)，3)] **図3.2.1-3**には高欄部の突出防止対策の一例を示す．

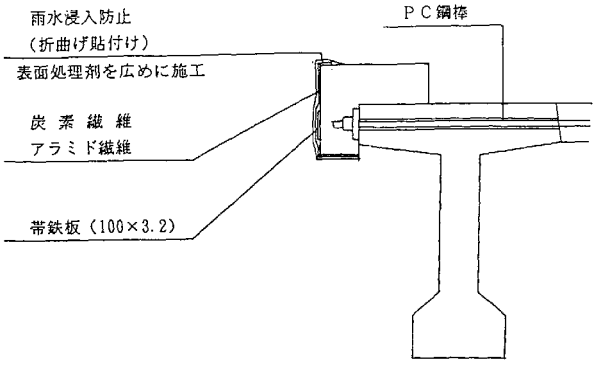


図3.2.1-3 ＰＣ鋼材定着部保護工法の一例 [3)]

b. 劣化速度の抑制，劣化因子の除去

① 電気化学的防食工法

電気防食工法，脱塩工法や再アルカリ化工法等の電気化学的防食工法をＰＣ構造物に適用する場合は，通電により発生する水素がＰＣ鋼材に及ぼす影響について十分に検討しなければならない．ＰＣ鋼材は，鉄筋等の普通鋼材に比べ高応力で使用されているため，水素脆化に対する感受性が高く，遅れ破壊を起こす可能性の高い鋼材である．そのため，常時通電を行う電気防食工法の場合は，ＰＣ鋼材の電位を水素が発生しないように設計しなければならない．また脱塩工法の場合は，水素の発生を避けることはできないので，ＰＣ鋼材に悪影響を与える量の水素が発生しないように通電方法を検討する必要がある．一般に脱塩工法が適用される場合の通電方法は，1A/m^{2}の電流密度で4～8週間の連続通電であるが，ＰＣ構造物に脱塩工法が適用される場合は，断続通電が採用されることが多い．**図3.2.1-4**に施工フローの一例を示す．

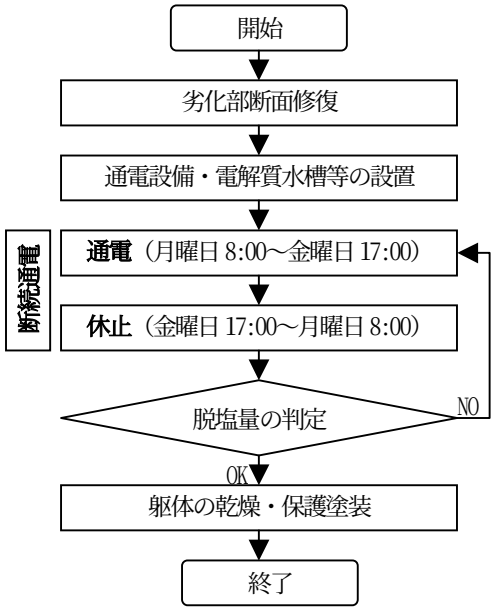


図3.2.1-4 ＰＣ構造物の脱塩工法の施工フローの一例 [4)]

c. 耐荷力，変位性能の改善

①外ケーブル補強工法

ＰＣ鋼材の腐食破断などが認められた場合，耐荷性能の向上や変位性能の回復を図るための方策としプレストレス導入工法がある．図3.2.1-5には外ケーブル補強工法の代表的な事例を示す．

また，新しい類似工法として板状に成形された炭素繊維ＦＲＰ板にプレストレスを導入し，桁下に定着することにより既設構造物にプレストレスを導入する工法がある．[6)]

外ケーブル工法を適用するに当っては，定着具がコンクリートの外に設置されることになり，大気中の劣化因子により腐食することが危惧されるため，定着具には亜鉛メッキや樹脂充填等の適切な防食対策を施す必要がある．

参考文献

1) 日本道路公団試験研究所，プレストレスト・コンクリート建設業協会：ＰＣグラウトの補修マニュアル，平成１５年３月
2) 財)鉄道総合技術研究所：ＰＣグラウトの再注入等補修マニュアル，平成１４年８月
3) 高速道路調査会：ＰＣ橋点検補修マニュアル（案），平成６年１２月
4) 土木学会論文集No.641/V-46：ＰＣ鋼材の水素吸蔵特性に着目したデサリネーション処理方法の検討，平成１３年２月
5) プレストレスト・コンクリート建設業協会：外ケーブルに方式よるコンクリート橋の補強実例図集，平成１３年６月
6) 橋梁と基礎：調布高架橋のアウトプレート工法による補強工事と実橋載荷試験，平成１７年１０月

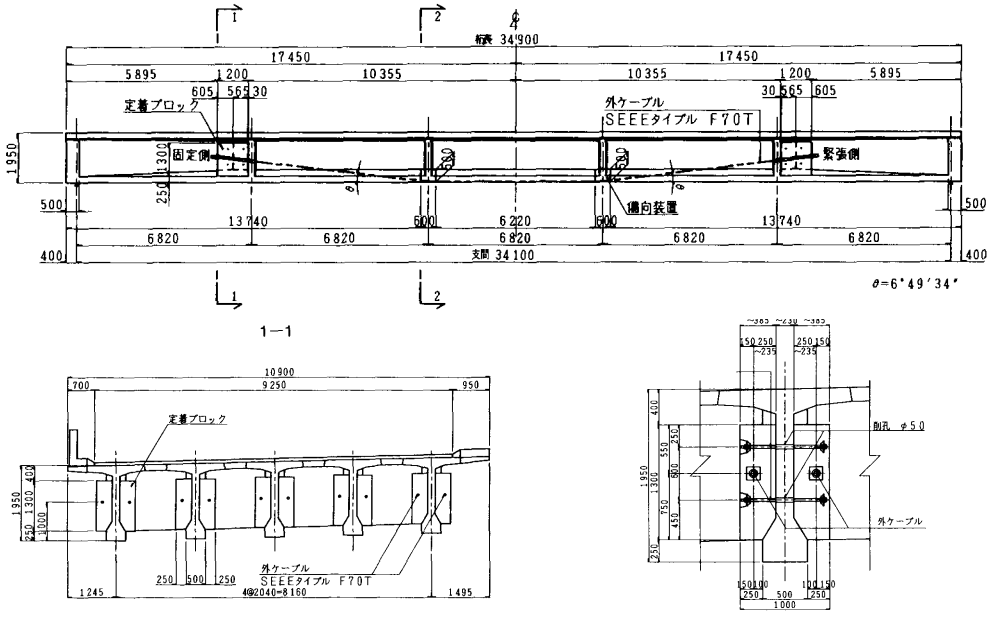


図3.2.1-5 外ケーブル補強工法の一例 [5)]

表3.2.1-2 研究会参加企業提供技術（ＰＣ鋼材関連の劣化に対応する工法）

技術資料番号	技　　術　　名　　称	副　　題
7	ＮＡＰＰ工法	中空PC鋼棒を使用したプレテンション方式によるPC工法
11	PC構造物に対する電気化学的脱塩	
13	TRUMP system	下弦ケーブルを用いた有ヒンジラーメン橋のたわみ抑止･回復対策工法
15	ｱﾗﾐﾄﾞ緊張材を用いた外ｹｰﾌﾞﾙ用ﾌﾟﾗｹｯﾄ固定方法	プレテンション方式による定着工法
40	吹付けモルタルによる耐震補強工法	薄い断面増加でRC断面増し厚工法と同程度の補強可能
42	耐酸コンクリート工法	硫酸イオンに強い酸性河川･酸性地盤対応コンクリート
	合計　6技術	

3．3　鋼構造物への対応策

3.3.1　腐食への対応策

(1)　対応策の要求性能

1)鋼材の腐食

腐食は普通鋼材（塗装や亜鉛めっき等による防錆を施している）では，錆が発生している状態，錆が極度に進行し断面欠損等を生じている場合を指す.

耐候性鋼材の場合には，安定錆が形成されず異常な錆が生じている場合や，極度な錆の進行により普通鋼材と同様に断面欠損が著しい状態を指す.

腐食が発生し易い箇所としては，漏水の多い桁端部，支承部周辺，通気性・排水性の悪い連結部，泥等が堆積し易い下フランジ上面等である.

補修による要求項目は，機能の低下，喪失した表面皮膜を除去し再生させることであり，補強においては断面欠損した部位の断面回復が一般的である．腐食対策における要求性能として，下記が考えられる.

①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.

②断面欠損した部位の腐食部分を除去し，断面回復を行う.

具体的対策としては,

表面皮膜の再成形：

・塗り替え塗装

・亜鉛溶射

などが挙げられる.

断面欠損部の断面回復：

・板継溶接による断面再成形

・当て板による断面補強

などが挙げられる.

2)その他の腐食

落橋防止装置（ＰＣケーブル），支承付近にも腐食発生の可能性が高い.

ＰＣケーブルの場合は，桁の温度変化等により桁との接触部分の皮膜が摩擦により損傷し，損傷箇所から水等が侵入し内部鋼線の腐食の要因となる.

支承付近の場合は，桁端部等漏水の可能性が高い部位において，発錆が進展し腐食に至る.

これら腐食による損傷は，将来的には部材の断面欠損にまで及び，部材自体の機能喪失に繋がるため，早期段階での対応が求められる.

よって，要求性能としては,

・表面皮膜の機能回復

・断面欠損部位の断面回復

が挙げられる.

(2)　要求性能の評価方法

腐食はその進行状況により対応策が異なるため，状況を把握した上で決定する.

1.皮膜表面の発錆，軽微な腐食

要求性能：腐食因子の除去

評価方法：塗膜の塩分測定

2.表面皮膜の機能低下，喪失

要求性能：表面皮膜の取替え

評価方法：素地調整の程度確認，塗膜厚検査

3.内部鋼材の腐食，断面欠損

要求性能：鋼材部の断面回復・取替え

評価方法：部材の強度、耐久性の調査

(3)　要求性能に応じた対策工と具体的対策

a）腐食因子の除去

塗膜表面に点在する錆を部分的に除去し，補修塗装を行う.

b)表面皮膜の取替え

①塗替え塗装

劣化した塗膜を素地調整にて除去し（鋼材面まで露出），新規塗装を施す.

②亜鉛溶射

劣化した塗膜を素地調整にて除去し（鋼材面まで露出），溶融した亜鉛を吹き付けることにより新規防錆機能を形成する.

③保護テープによる補修

ＰＣケーブル等の鋼材（鋼線）が被覆されている場合は，外的要因により損傷亀裂の発生した箇所に，専用の保護テープを貼り付けることにより補修を行う.

桁端部等漏水の可能性が高く，他の部位と比較して腐食が発生し易いと考えられる箇所は，定期的な点検と補修を行うのが良いと思われる.

c)鋼材部の断面回復，取替え

①板継溶接による断面回復

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．既設鋼材の板厚が厚い場合は，溶接による導入熱量が大きくなり，ひずみも大きくなるため施工時には注意が必要である.

②当て板による断面補強

断面欠損部にボルト添接または溶接によって当て板を設置し，不足断面の補強とする．部材の形状寸法，部位によってはボルト配置やボルト締めが困難となる場合もあるので，施工方法を含めた構造検討が必要となる.

③部材の取替え

ＰＣケーブル，支承等が断面欠損により機能が低下・

喪失している場合は，取替えを行う．

腐食により機能低下した構造物への補修・補強の一般的な方法を**表 3.3.1-1** に示す．

表 3.3.1-1　鋼材腐食に対する補修・補強方法の選定

要求性能	潜在期 工法	進展期 工法	加速期 工法	劣化期 工法	発揮する性能	評価
表面皮膜の形成	―	錆の除去 ＜内容＞ 表面に発生している軽微な錆の除去を行い、部分的に補修塗装を施す．	塗り替え塗装 ＜内容＞ ケレンにより現状塗装を除去後に、新規塗装を施す． 亜鉛溶射 ＜内容＞ ケレンによる素地調整後亜鉛メッキを吹き付けて防錆処理を行う．	塗り替え塗装 ＜内容＞ ケレンにより現状塗装を除去後に、新規塗装を施す． 亜鉛溶射 ＜内容＞ ケレンによる素地調整後亜鉛メッキを吹き付けて防錆処理を行う．	腐食部への酸素、水分供給の遮断	工法実施から約５０年程度 (表面皮膜の寿命)
劣化部の除去･取替え	―	―	―	断面再成形 ＜内容＞ 腐食箇所を切断除去し板継溶接により、鋼材断面を再成形する． 当て板補強 ＜内容＞ 腐食部位の表面をケレンにより素地調整した後、断面欠損部を当て板(ボルト接合)にて補強する． 取替え ＜内容＞ 腐食部位の全面交換．(落橋防止装置ＰＣケーブル，支承等)	腐食による断面欠損部の断面回復． 完全取替えによる機能回復	工法実施から約５０年程度 (取替部材の寿命)
工法選定の理由	一般的な点検、検査では異常が見られないため、対策は不要と考える．	腐食の前段階である軽微な点錆が塗膜上に確認される． 大がかりな補修は必要とせず、部分的な劣化因子の除去とする．	表面皮膜が破れ、鋼材表面に錆が進行している機能を失った塗膜、鋼材表面の錆の除去等劣化因子の排除を行うとともに、新規表面皮膜の形成を必要とする．	鋼材の錆が進行し、断面欠損を伴っているため、断面回復を必要とする． 断面の再成形(取替え)欠損部の補強を状況により採用する．		

3.3.2 亀裂への対応策

(1) 対応策の要求性能

1)疲労亀裂

鋼橋における亀裂の多くは疲労が原因であり，発生する部位により応力状態，初期状態が異なる．鋼床版の床組，伸縮装置のフィンガー部では直接の輪荷重による応力が，二次部材（溶接部）においては二次応力によるものが主である．また，ランガー形式のような場合，吊材（支材）に風によって生じる渦励振などの振動によって亀裂の生じる例がある．さらに支承は反力の変動による比較的大きな応力振幅が要因となるとともに，据付時の調整誤差による付加的な応力が要因となる場合もある．

疲労は鋼材降伏点以下の引張り（正）応力が繰り返し作用することによって微小な亀裂が発生・進展し，最終的には破断にいたる現象である．劣化の進行は目に見えないミクロの亀裂が分子レベルで発生する段階から始まり，やがて鋼材もしくは溶接部の表面にごく小さな亀裂が現出する段階に至ってはじめて点検・検査で確認される．

現在の点検・検査では技術的，経済的にもミクロ段階で亀裂を発見し対処することは非常に難しい．多くの場合は劣化進展期後半から加速期あるいは劣化期に相当する，ある程度の進展した亀裂を発見した後の対処的な対策とならざるを得ない．

疲労亀裂の発生要因は上記の通り，変動応力とその繰り返しである．また，局部における応力状態を支配する要因としては部材形状や溶接形状（仕上げ形状）による応力集中が挙げられる．

このような疲労亀裂に対する対応策への要求性能として，下記の３つが挙げられる．

要求性能①：亀裂の進展を抑制する．
要求性能②：亀裂部を修復（亀裂を除去）し，初期状態に復帰させる．
要求性能③：亀裂部を修復した上で，さらに，再発防止のための改良を加える．

2)その他の亀裂

落橋防止装置，支承近辺など高応力域の取付け部における溶接もしくはボルト孔において亀裂発生の可能性がある．

各要素は静的な応力に基づく設計によって各部の強度が決められており，各要素が十分に機能している場合は問題になることはない．しかしながら経年変化により可動部が可動しない（回転部が回転しない）場合などには，設計で予期しない断面力が生じ局部的に降伏点を超過する応力が生じる可能性がある．

これらの亀裂損傷は急激な進展の可能性があるとともに疲労亀裂の基点にもなりうる．従って速やかに補修・補強を施す必要がある．

発生要因は構造物そのものの強度とともに，支承や落橋防止のピン，スライド機構が機能しないなどの二次的な要因も見逃せない．

従って，これらの亀裂に対する対応策への要求性能としては(1)の 1)で示したもののほかに，必要により例えば以下のような要求性能を設定していく必要がある．

- 材料（部材）の強度を確保した上で，亀裂の急激な進展の抑制する．
- 周辺機能を確保する（回転部の可動性など）．

(2) 要求性能の評価方法

1)亀裂に対する対策の評価方法

a) 要求性能①について

点検時などに経過観察を継続的に実施し，想定どおりに亀裂の進展が停止していることを確認する．

b) 要求性能②について

現在の点検技術ではミクロ段階での亀裂の再発を発見することは困難であるため，点検時などに補修部位の経過観察を継続的に実施し，溶接部の表面に亀裂が現出していないかなど，その健全性を確認する．

c) 要求性能③について

再発防止の方策は，主に損傷部位の応力集中の緩和低減を目指したものになると考えられる．このような場合，具体的には事前に設計計算やＦＥM解析などにより想定した低減量と，ひずみゲージなどにより計測した実際の応力振幅低減量を比較することなどにより評価を行う．

2)その他の亀裂に対する対策の評価方法

亀裂発生の原因が構造にあり，構造の根本的な改良が必要となる場合には，応力集中といった亀裂に直結する事項に加えて，改良した構造そのものの機能的な妥当性について，解析・検証実験などにより確認を行う．

また，原因に土砂の堆積など周辺環境まで含めた要因が考えられる場合は，構造の問題だけではなく環境条件を改善する方法も含めた総合的な評価が必要になる．

(3) 要求性能に応じた対策工と具体的工法

対策工とその具体的工法は，対象となる部位の構造，重要性，施工条件，経済性などを総合的に評価した上で決定する必要がある．

部　位：主要部材か二次部材か
重要性：亀裂が発生・進展した場合に安全性，経済性などに大きな損失が生じないか

施工条件：交通規制，使用機材，工期など
経済性：コスト（将来発生が予測されるものを含め）
その他：損傷部位の追跡調査，点検・観測方法

以下に各要求性能に応じた対策工と具体的工法を示す．

a)　亀裂の進展を抑制する方法＜要求性能①に対して＞

亀裂の先端部にストップホールを設ける方法が代表的である．

ストップホールは亀裂先端に円形の孔を設け応力を緩和する方法である．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．

ストップホールは発生した亀裂が構造の機能に対して悪影響を及ぼさず，亀裂そのものを残存させても問題がない場合に用いる．たとえばウェブ補剛材取付けのスカラップから進展した短い亀裂など，主部材の機能に直接関与しないものに対して用いられる．

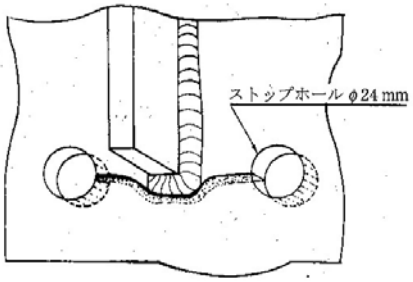


図 3.3.2-1　ストップホール
出典：「土木構造物の点検・診断・対策技術
日本鋼構造協会」

この対策工は，亀裂そのものが残存した状態で母材に新たな欠損を設けることになり，強度的，防錆的に悪影響を及ぼす可能性があるため，部位を慎重に選定した上で実施を判断する必要がある．また，施工が容易であることから短期的な対策で用いる場合もあるが，その効果を十分検証した上で最終的な対策を行うべきである．

強度：設計上は応力が緩和される
施工：比較的容易
将来の管理：設計数値により継続的な点検が必要

b)　亀裂部を修復する方法（初期状態に復帰する方法）＜要求性能②に対して＞

亀裂を補修し，初期状態に戻すもので，溶接の直し，亀裂部分の取り替えなどがある．また，ごく小さな亀裂の場合，若干の断面欠損は生じるがグラインダーによる亀裂部の除去も含まれると考えられる．

構造的には初期状態に復帰させるものであり，亀裂が再発する可能性がある．また，溶接による場合は残留応力，ひずみが付加されることから，応力条件は悪くなる可能性もある．さらに多くの場合は現地施工となり，品質にも限界がある．

亀裂を残存させた上でバイパス的な部材を取付ける方法（カバープレート，当て板）も考えられる．その場合，応力の流れの変化により他の部位が弱点とならないよう留意する必要がある．また，当て板等により残存亀裂が

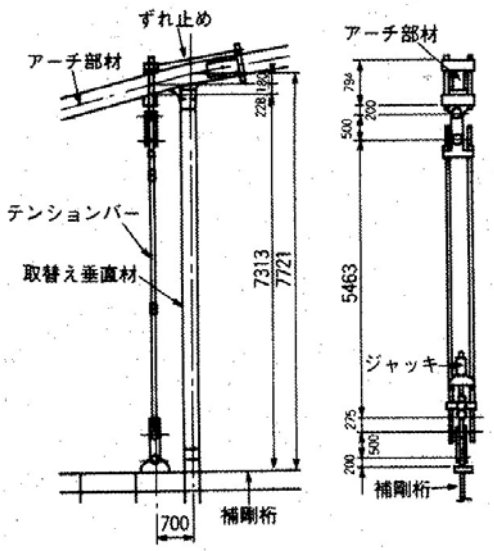


図 3.3.2-2　部材取替え（アーチ吊材）
出典：「土木構造物の点検・診断・対策技術
日本鋼構造協会」

表 3.3.2-1　適用工法と比較

工法	潜伏期	進展期	加速期	劣化期
ストップホール（＋補強）	亀裂の発生の検出は困難であり、実質的に対策は不可	―――	ある程度進展した亀裂に対して応力緩和する	
溶接補修		初期状態に構造を直す。	―――	―――
溶接補修＋補強		初期状態に構造を直すとともに再発しないよう補強する。		

まとめると　　観察できなくなると，進展状況の確認ができなくなるた

め好ましくない．**図 3.3.2-2** に取替えの一例を示す．

いずれの場合も補修箇所は再度損傷する可能性を有しており，将来にわたっての点検・検査が不可欠である．

まとめると

強度：設計上は初期状態と同じ．場合によっては溶接残留応力が大きくなる恐れあり

施工：比較的容易

将来の管理：初期状態に戻すだけであれば亀裂再発の可能性がある．要観察，点検

c) 亀裂を修復した上で再発しないように改良する方法
＜要求性能③に対して＞

亀裂を補修した上で再発しないように改良するものであり，恒久対策といえる．

溶接部の亀裂を補修（取り替え）した上で，溶接サイズや板厚の増により応力緩和し，疲労限以下とする方法，バイパスリブによって応力の流れを変え，疲労限以下とする方法などが考えられる．

十分な対策を施した場合は将来に亘る亀裂再発の可能性は小さくなる．

しかし，b)と同様に，対策施工による鋼材や応力状態の変化，応力伝達機構の変化による新たな弱点の創出の恐れもあり，十分な検討が必要であるとともに，検査，観測などによる追跡も行うべきである．

まとめると

強度：設計上は応力が緩和される．ただし追加部材などにより応力の流れが変わることは留意しておく必要あり．

施工：前のａ）ｂ）二つの方法と比較して困難

将来の管理：設計数値によっては，継続的な点検が必要

また，近年，金属組織制御による鋼材の疲労亀裂進展特性の改善を図った鋼材が実用化されており [1]，すでに船舶等の分野において，高い疲労強度を必要とされる部位に適用されている．この鋼材の橋梁部材への適用性の検証も行われており [2]，入念な施工方法の検討を行った上で，疲労強度の改善を図る工法などが期待される．



写真 3.3.2-1 当て板

出典：「土木構造物の点検・診断・対策技術
日本鋼構造協会」

他の具体的工法としては，補修・補強に関する指針及び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，表 3.3.2―2 に示す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3.3.2-2 研究会参加企業提供技術（疲労亀裂に対応する工法）

技術資料番号	技術名称	副題
3	BARD床版工法	トラス鉄筋付ハーフプレキャスト版を用いた床版構築工法
25	スーパー床版	橋梁用プレキャスト合成パネル床版
44	疲労特性に優れた厚鋼板	
	合計 3技術	

3.3.3 その他劣化への対応策

(1) 高力ボルトの劣化

1)要求性能

高力ボルトは構造のブロック間を接合するものであり，その劣化は場所によっては致命的な損傷を引き起こしかねない．また，ボルトの破断によりボルトの頭もしくはナット，ワッシャが落下する可能性がある．都市内に建設された構造の場合，人的・物的な第三者被害を生じる可能性がある．

ボルトにおいて考えられる劣化の多くは遅れ破壊であり，現在用いられている F10T（S10T）の高力ボルトではその発生はほとんど見られない．しかしながら，1979 年の JIS 改訂以前の F11T を適用している場合は破壊が見られる．

添接部が強度を伝達できなくなることは構造の崩壊に結びつきかねない問題である．従って，主構造部については可能な限り予防的対策として（F10T への）ボルト取替えが求められる．また，未取替えの添接箇所において遅れ破壊が見つかった場合は残ったボルトにおいても破壊が生じる可能性が大であるため，速やかに全量の取替えが必要である．

このような高力ボルトの劣化に対する対応策への要求性能は以下のようになる．

- ボルトの破断に対する構造強度の確保
- 落下による第三者被害の予防

2)要求性能の評価方法

F10T は F11T に比べ約 5%許容応力度が低下する．従って，既存のボルト本数で必要な継手強度を確保できるかの照査確認を行う．この際，強度が不足する場合には，ボルト本数やボルト径の変更といった対処を行う．

3）対策工と具体的工法

具体的な対策工としては，前述のとおりボルトの F11T から F10T への取替えが挙げられる．

ボルトの取替えは作用力の小さいもの，取替えによる変形，すべりの影響の小さいものから順番に行う．

F10T への取替えは上記強度，施工手順の問題さえ確実に行えば，将来への問題も払拭される．経済的な問題から損傷発生後の施工となる場合も考えられるが，極力早期に取替えを行うことが望まれる．

また，予防的な措置として添接部にネットを設置し，ボルトの落下を予防する場合がある．これは第三者被害を予防する方策としては有効であるが，構造強度に対しては寄与しない．補修・補強の観点からは可能な限り速やかに取り替えることが求められる．

(2) 全体系の劣化

1)要求性能

全体系の劣化は要因が複合して現れる場合が多く，次のような例があげられる．

- 主構造系の変形による大きな活荷重たわみ
- 境界（支承，伸縮装置）の劣化に伴う変形，振動の増大

加えて床版の劣化も引き起こされ，さらに変形が大きくなるという悪循環もおきうる．

各構造に要求される性能は各論に示す通りであるが，全体系に対してはその使用性が問題となる場合が多い．従って個別の部材の強度だけでなく，全体系のたわみ，振動を抑えることが求められる．

このような全体系の劣化に対する対応策への要求性能をまとめると以下のとおりで，いずれの場合も安全性を第一とし，さらに劣化の進行を食い止める手段が求められる．

- キャンバーの確保とたわみの増大の抑制
- 振幅の低減と振動の増大の抑制

2)要求性能の評価方法

構造物の使用性の回復と確保について，定量的な評価を行う．具体的には，実橋に対する載荷実験や振動実験により直接的にその使用性を評価する方法のほかに，ひずみゲージなどによる計測値による間接的な評価方法や，解析的な評価方法といったものが挙げられる．

3）性能に応じた対策工と具体的工法

全体系の劣化に対しては，キャンバー復帰といった大掛かりな対策が必要となる．具体的工法としては，外ケーブルによる補強工法やジャッキアップダウンを伴う工法（合成桁の場合など）といったものが挙げられる．また，多くの場合，施工ステップを反映した全体系構造解析といった構造力学的な検討が必要となることにも留意が必要である．

具体的工法としては，補修・補強に関する指針及び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，表 3.3.3−1 に示す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．

参考文献

1) 誉田，藤原，有持，大西，山下：疲労き裂進展を自己抑制する新機能厚鋼板の開発，まてりあ，第 43 巻　第 2 号，2004

2) 二村，坂野，磯田，近藤，有持，誉田：耐疲労鋼を用いた主桁ー横桁接合部の疲労強度の検討，土木学会第 59 回年次学術講演会，2004

表3.3.3-1 研究会参加企業提供技術（全体系の劣化に対応する工法）

技術資料番号	技術名称	副題
36	外ケーブルによる鋼橋の補強	
	合計 1技術	

第４章　延命化対策工選定システム

4.1　システム概要

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部材，ＰＣ部材，鋼部材の各構造部材を対象としている．構造部材毎に，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 4.1-1，図 4.1-2** 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．



図 4.1-1　延命化対策工選定システム起動画面

表 4.1-1　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	構造部材	ＲＣ部材	ＰＣ部材	鋼部材			
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					

※画面は開発中のものです.

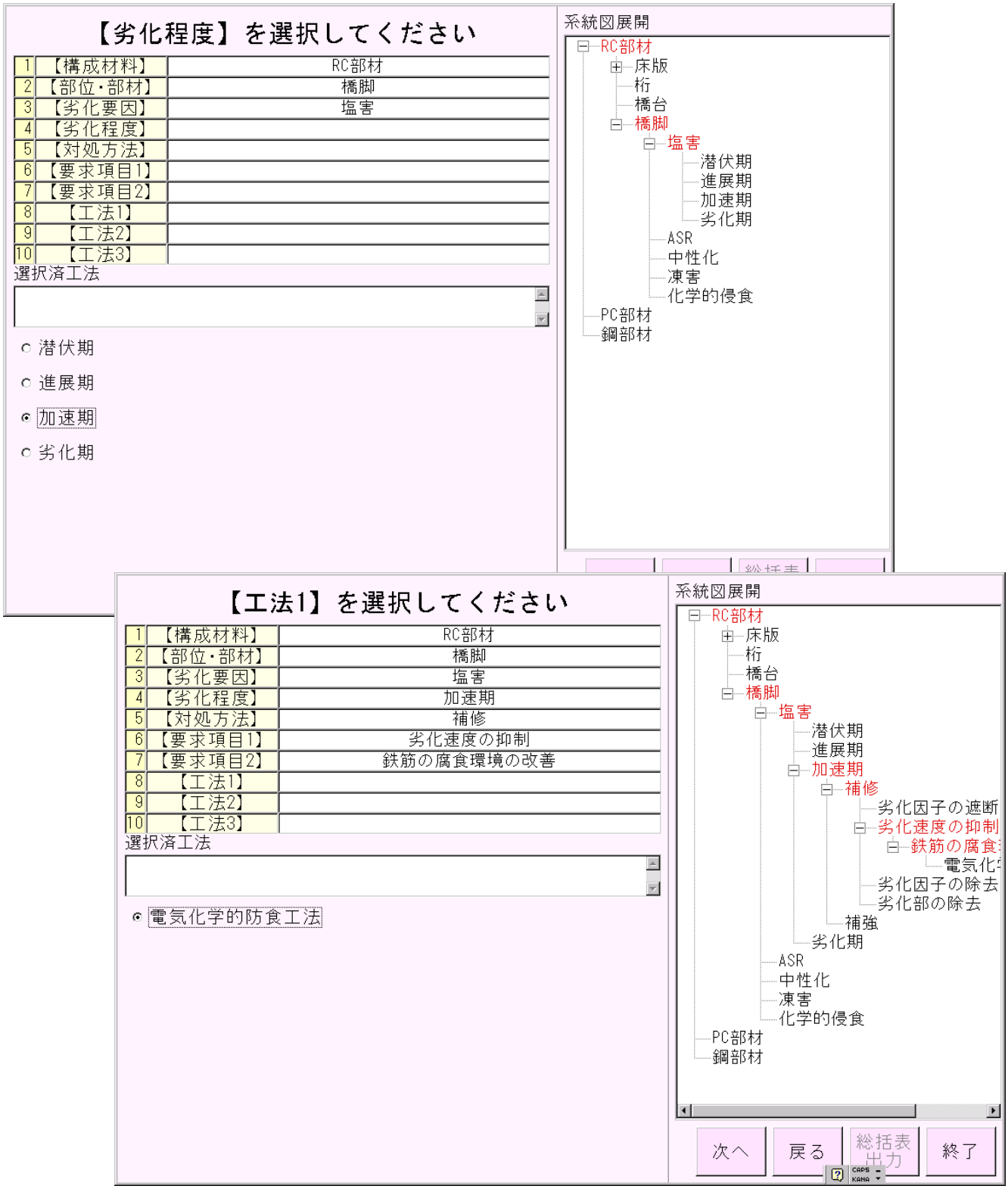


図 4.1-2　メイン画面の表示例

4.2　システム操作方法

4.2.1　システム起動



図 4.2.1-1　システム起動画面

システムを起動するとまず起動画面（**図 4.2.1-1**）が現れる．[START]ボタンをクリックすると，メイン画面（**図 4.2.1-2**）が現れる．

クリック

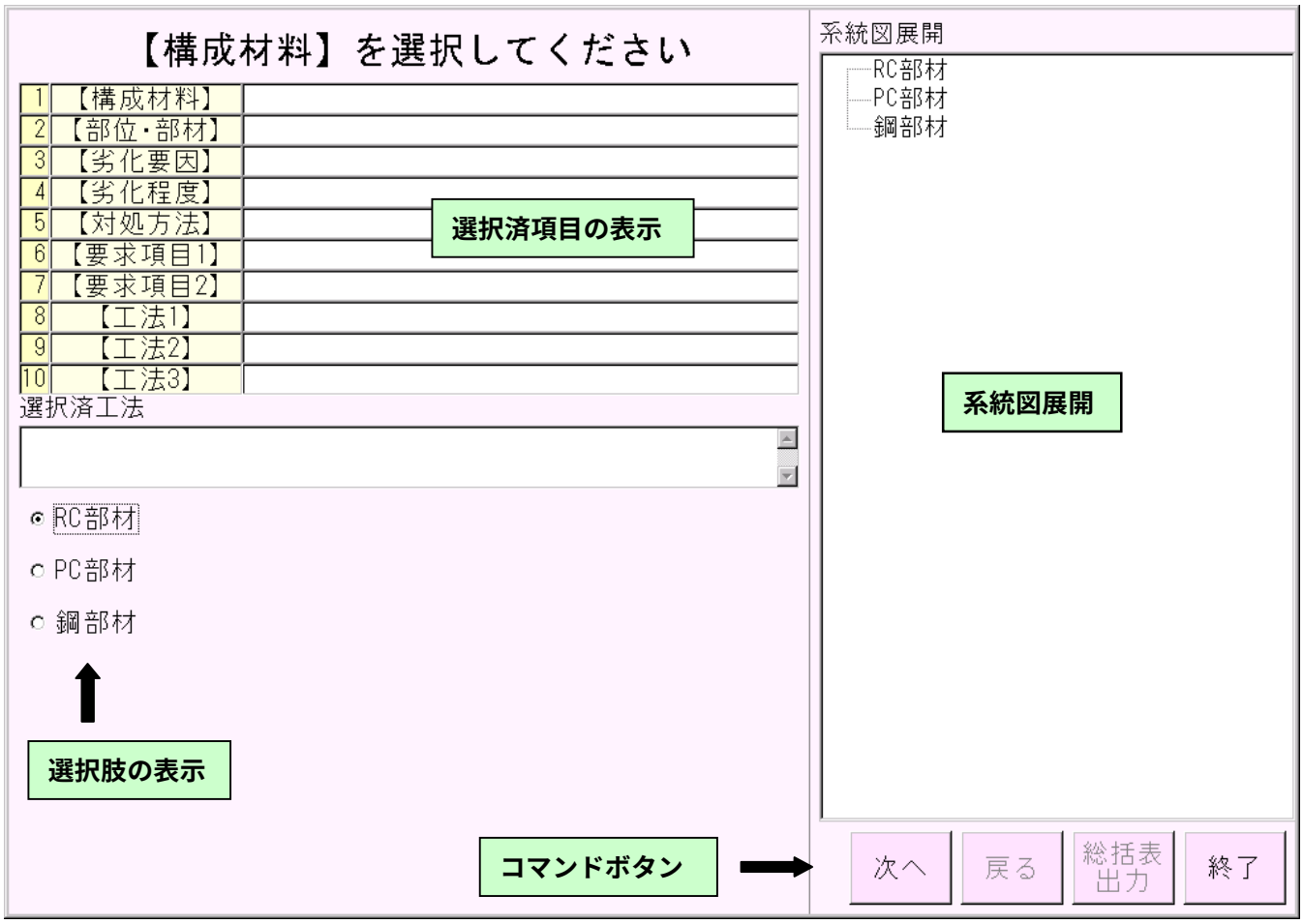


図 4.2.1-2　メイン画面

4.2.2　条件選択方法

(1)　左下選択肢からの選択方法

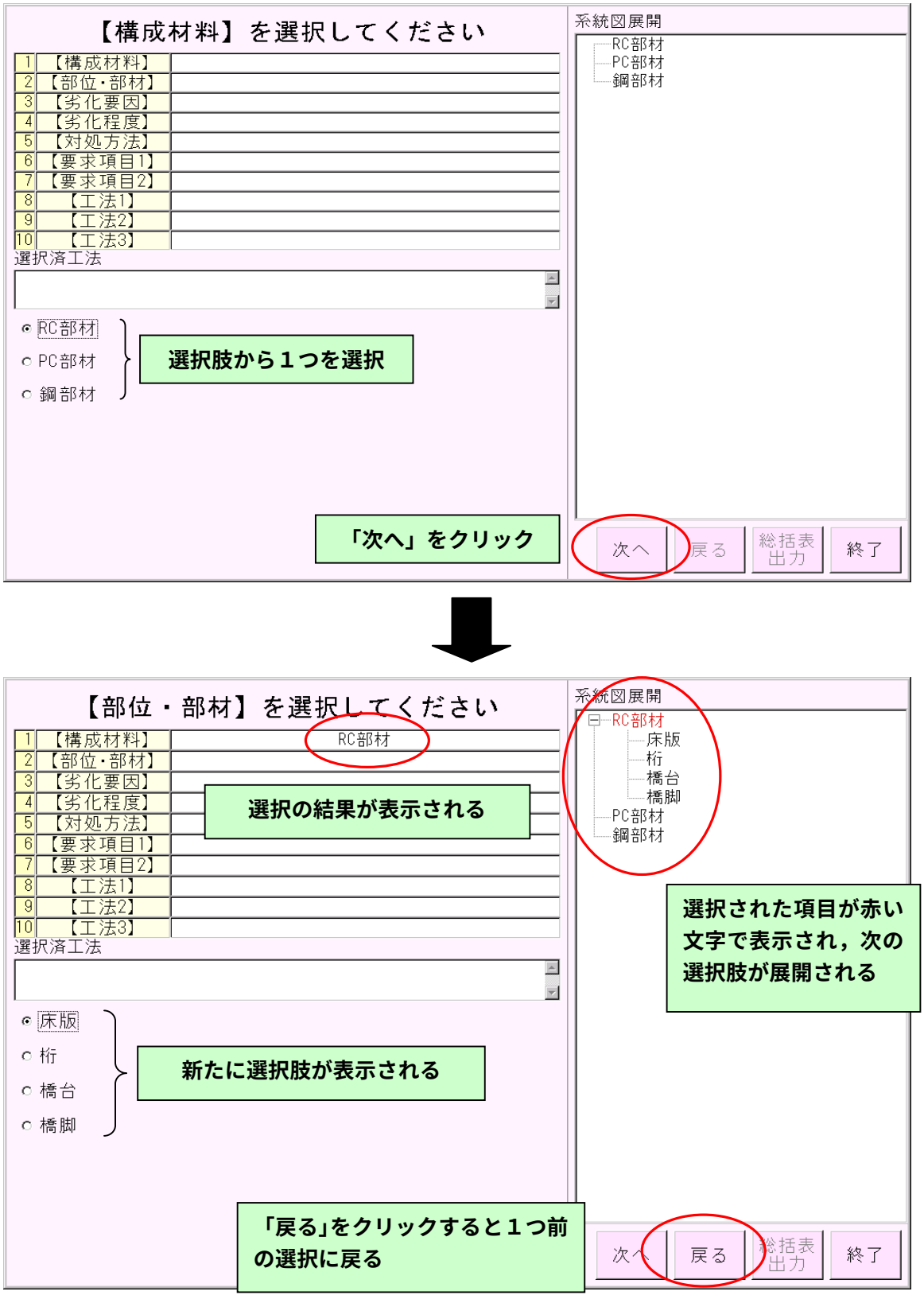


図 4.2.2-1　左下選択肢からの選択方法

(2)　右側系統図からの選択方法



図 4.2.2-2　右側系統図からの選択方法

※　(1)左側選択肢からの選択方法と(2)右側系統図からの選択方法は連動しており，選択方法は任意に変更可能.
例えば，「構成部材」を左下選択肢から，「部位・部材」を右側系統図から選択することも可能.

4.2.3　選択終了のしかた

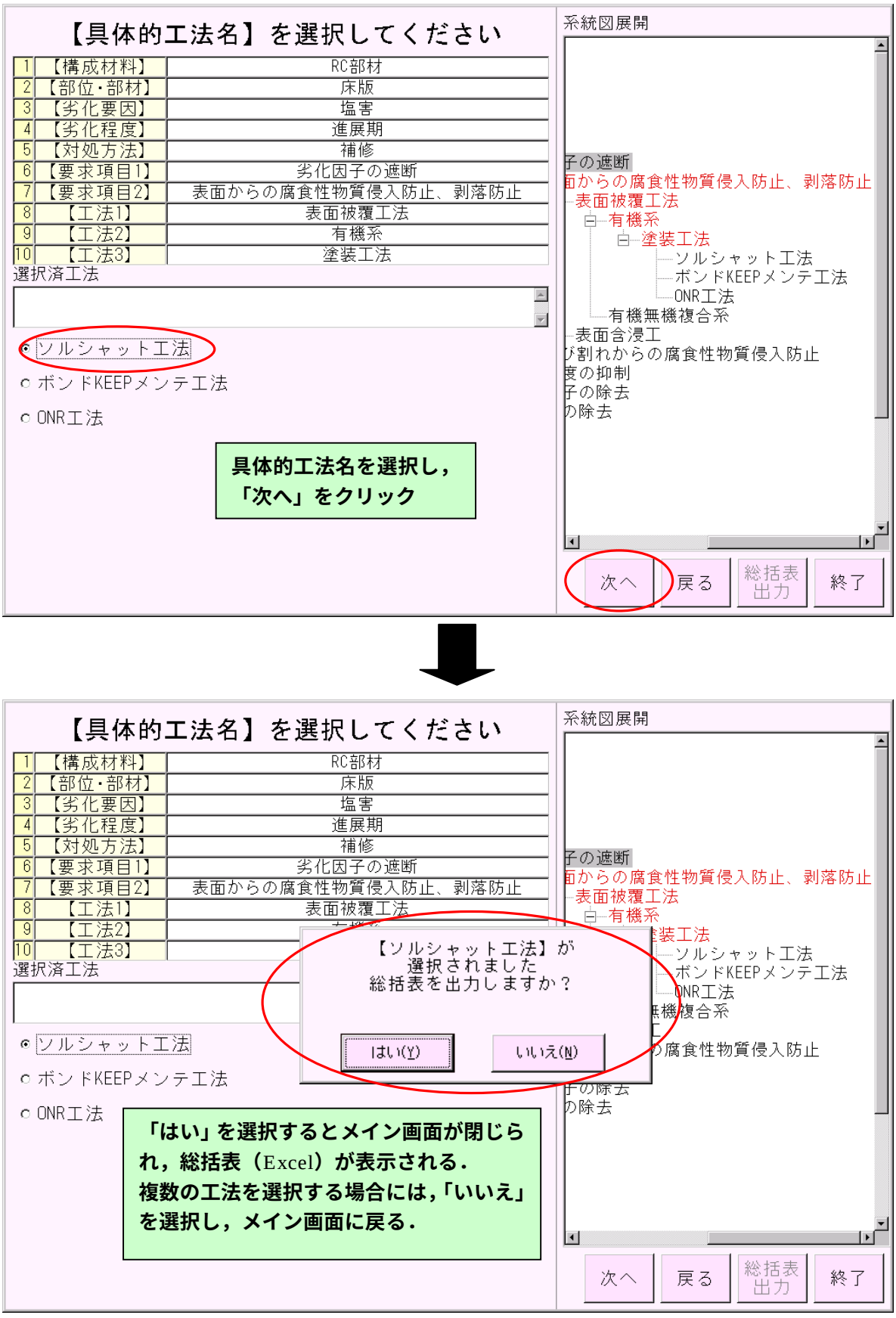
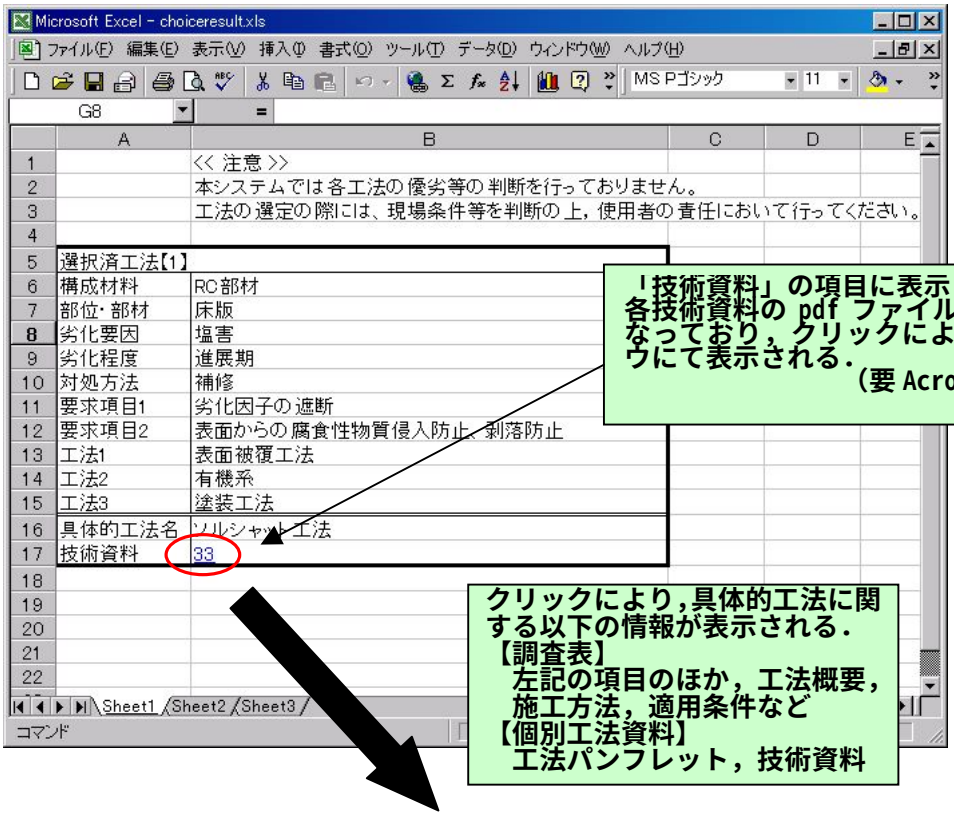


図 4.2.3-1　選択終了

4.2.4　総括表



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（グラウト含む）				
	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 4.2.4-1　選定結果の表示例

第 5 章　今後の方針

アセットマネジメントの考え方では, 既設橋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，既設橋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対策シナリオを設定し、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が重要である．

このような観点から、プロトタイプ“ 延命化対策工選定システム ”をユーザーに判断を委ねない実用的なシステムに発展させるには、主に次のような考え方を導入する必要があると考えられる．

(1)　現有性能評価

劣化程度を潜伏期、進展期、加速期、劣化期と分類し画一的に対策シナリオ並びに対策工を簡易的に設定することもできるが、さらに工学的な見地から劣化程度を既設橋の性能評価として表現し精度を向上させる必要があると考えられる．

既設橋に必要な性能を安全性能として耐荷性能、使用性能として変形性能、第 3 者影響度に関する性能、美観･景観とする．既設橋の性能評価は現時点で有する性能すなわち現有性能と最低限保証されなければならない性能すなわち限界性能を比較することで評価するとする．たとえば、安全性能である耐荷性能では曲げ耐力、せん断耐力、曲げ+せん断耐力に関して、

現有耐荷力　＜　限界耐荷力

or

現有耐荷力　≧　限界耐荷力

として工学的に性能評価され、対策シナリオが設定されることになる．対策シナリオに対応した対策工を選定するに際しては、現有性能と限界性能との差である性能低下程度に応じた対策工を選定することが合理的である．このような工学的な判断をシステム運営上、点検調査情報とリンクさせることで実用的システムが構築できると考えられる．

(2)　将来性能評価

最適な対策工を選定するためには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対策工を評価する必要があり、特に費用対効果の優れた対策工を選定するという観点からＬＣＣは重要な指標と考えられる．

ＬＣＣでは、対策工実施の有無に関わらず既設橋の将来に向けた性能低下性状を把握し、その性状を工学的な判断に基づいた性能低下曲線で表現する必要がある．特に、対策工が実施された場合の将来性能評価については、未だ未知な領域もあるため十分な調査検討が必要であると考えられる．

(3)　対策工実施条件

既設橋の性能評価、ＬＣＣ評価など論理的評価によって対策工を選定するだけでなく、対策工を実施し供用される上で選定を制約する条件も設定する必要があると考えられる．

特定の対策工法の特徴と施工箇所条件たとえば適応足場種別、アプローチ手段などの条件、施工時の振動、騒音、水質などの周辺環境影響条件、また水分供給、日射、車両振動など立地条件との適合性によって対策工選定が影響されると考えられる．

以上の考慮すべき項目をプロトタイプ“ 延命化対策工選定システム ”に導入しシステムの高度化を図り、実務上試行運用することによるアンケート調査を実施し改善していくことにより、「どの既設橋から，どの時期に，どのような対策工を実施するのが最適延命化方策か」という回答が得られる実用的システムへと発展できると考えられる．

参考資料

当研究会の延命化対策工選定システムのデータベースは，補修・補強に関する指針及びマニュアル等に記載されている各種技術とともに，当研究会参加企業の最新技術を加えた.

最新技術を収集するにあたり，当研究会参加企業 31 社に対し，保有している最新技術の募集を行った結果，参加企業及び参加企業関連会社 19 社より 48 技術の提供を受けた.

次頁以降に各技術名称，副題及び企業名の一覧表を掲げる.

研究会参加企業提供技術一覧表

技術資料番号	技術名称	副題	提出企業名
1	ＡＳＲリチウム工法	既設構造物のアルカリ骨材反応抑制工法	鴻池組 極東工業
2	ASフォーム工法	レジンコンクリートパネルによる表面保護工法	清水建設
3	BARD床版工法	トラス鉄筋付ハーフプレキャスト版を用いた床版構築工法	飛島建設
4	ＣＰＲ工法	Confining Pile Reinforcement Method	間組
5	CS-21工法	コンクリート改質剤	飛島建設
6	HiPer　CF工法	緩衝材を用いた炭素繊維シート接着工法	清水建設
7	ＮＡＰＰ工法	中空PC鋼棒を使用したプレテンション方式によるPC工法	オリエンタル建設
8	OES工法		オリエンタル建設
9	ＯＮＲ工法	Part1（塩害対策）	オリエンタル建設
10	ＰＣコンファインド工法	ＰＣ鋼材を用いた橋脚巻立て耐震補強（水中施工法）	PS三菱
11	PC構造物に対する電気化学的脱塩		富士PS
12	ＴＤＲショット工法	硬化促進剤を用いた新しいコンセプトの湿式吹付け工法	飛島建設
13	TRUMP system	下弦ケーブルを用いた有ヒンジラーメン橋のたわみ抑止・回復対策工法	富士PS
14	ＴＷＳ工法	ウレタン高圧注入漏水止水工法	東急建設
15	ｱﾗﾐﾄﾞ緊張材を用いた外ｹｰﾌﾞﾙ用ﾌﾞﾗｹｯﾄ固定方法	プレテンション方式による定着工法	三井住友建設
16	アラミド繊維シート補強工法		東急建設
17	ｳｫｰﾀｰｼﾞｪｯﾄはつり工法を用いた大規模断面修復技術		大林組
18	エネルギー吸収式耐震補強工法	ガラス繊維強化プラスチックロッド（3DSole）による耐震補強	PS三菱
19	エバーコン	表面被覆工法	鴻池組
20	かみ合わせ鋼板巻立て工法	かみ合わせ継手を用いた無溶接型機械式鋼板巻立て工法	清水建設
21	クイック・チェンジ工法	床版取替工法	鴻池組
22	コリジョンジェット工法	コンクリートのはつり深さを高精度で制御できるウォータージェット	鹿島建設
23	コロイダルシリカ	含浸性表面改質材	佐藤工業
24	ジョッツ・クリート工法	液体急結剤を使用したポリマーセメントモルタル系断面修復工法	東急建設 大林組
25	スーパー床版	橋梁用プレキャスト合成パネル床版	ショーボンド建設

研究会参加企業提供技術一覧表

技術資料番号	技術名称	副題	提出企業名
26	スムースボード工法	高靭性セメントボードを使用したコンクリート耐久性向上工法	大林
27	スラブコンバート工法	ORIKEN式低騒音床版取替え工法	オリエンタル
28	ソルシャット工法	異なった材料の積層化による表面被覆工法	清水建設
29	チタングリッドによる電気防食工法	帯状陽極を用いたコンクリート構造物の電気防食	PS三菱
30	ニッケル被覆炭素繊維シートを用いた電気防食工法	純国産材料による，”初の” 外部電源方式電気防食工法を実用化！	オリエンタル建設
31	ハイブリッドシート工法	特殊ラミネートシートを用いたはく落対策工法	ショーボンド建設
32	ピングラウト工法	発泡ウレタン注入による止水工法	清水建設
33	ﾌﾟﾚｷｬｽﾄＳＣデッキ	ﾌﾟﾚｷｬｽﾄＳＣデッキを用いた床版取替えの急速施工	川田工業
34	ラスパール	コンクリート切削装置	佐藤工業
35	リフレッシュシャワー工法	含浸防水材を用いた床版防水工法	鴻池組
36	外ケーブルによる鋼橋の補強		ハルテック
37	犠牲陽極材「ガルバシールドF」		鹿島建設
38	高靭性FRCを用いたハーフプレキャスト合成床版工法		鹿島建設
39	浸透性吸水防止材「マジカルリペラー」	コンクリートの耐久性を向上させる表面保護材料	鹿島建設
40	吹付けモルタルによる耐震補強工法	薄い断面増加でRC断面増し厚工法と同程度の補強可能	間組
41	繊維補強超速硬コンクリート補修工法		東急建設
42	耐酸コンクリート工法	硫酸イオンに強い酸性河川･酸性地盤対応コンクリート	大林組
43	炭素繊維シート補強工法	炭素繊維シートを用いたＲＣ構造物の補修･補強工法	青木あすなろ建設
44	疲労特性に優れた厚鋼板		住友金属工業
45	脈動ひび割れ注入工法		鴻池組
46	無機系封孔剤		佐藤工業
47	アイゾールEX工法	撥水･表面防水･浸透防水のトリプル効果をもつ透湿性被膜が、コンクリートの劣化を抑制する。	アイゾール
48	PICフォーム	ポリマー含浸コンクリート製埋設型枠による耐久性向上技術	大成建設

各々の技術は次頁以降の調査表に記入し、必要に応じてパンフレット等を添付したものを延命化対策システムのデータベースに供した。

橋梁構造物延命化技術　調査表

技術名称								
副　題								
開発会社名								
	問合先	部署名			担当者名			
		TEL		内線		FAX		
		E-Mail						
		URL						
開発体制	□単独	□共同研究（	□民民	□民官	□民学	□民官学 ）		
	共同研究名							
	共同研究ﾒﾝﾊﾞｰ							
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：全体系の変形、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			
	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（					
NETIS登録	□有り	□無し	登録年月日		登録番号			
特許・実用新案	特許	□有り	□出願中	□出願予定	□無し	登録番号		
	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						
	民間開発建設技術	証明機関			番号			
		証明年月日						
	その他の制度等による証明	制度の名称						
		証明年月日			番号			
		証明機関						
		証明範囲						
実施件数	□国交省	件	□その他公共機関	件	□民間等	件		
主な実積（実証実験等含）								

1．概要

2.特徴

3．施工方法

4. 適用条件

5. 施工･使用上の留意点

6. その他

7. 参考文献

橋梁構造物延命化技術　調査表（追加表）

技術名称							
副　題							
開発会社名							
	問合先	部署名			担当者名		
		TEL		内線		FAX	
		E-Mail					
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	
	実用新案	□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					
		証明機関				番号	
		証明年月日					
		証明機関				番号	
		証明年月日					
	民間開発建設技術	証明機関				番号	
		証明年月日					
		証明機関				番号	
		証明年月日					
		証明機関				番号	
		証明年月日					
	その他の制度等による証明	制度の名称					
		証明年月日				番号	
		証明機関					
		証明範囲					
		制度の名称					
		証明年月日				番号	
		証明機関					
		証明範囲					
		制度の名称					
		証明年月日				番号	
		証明機関					
		証明範囲					
技術適用項目	適用橋梁構造形式						
	適用劣化要因						
	要求性能						
	方法						

平成 19 年度

既設橋の最適延命化方策の評価・策定に関する研究

WG4
～鋼橋の延命化方策とモニタリングシステムの実装～

中間報告書

平成 20 年 1 月

既設橋の最適延命化方策の評価・策定に関する
研究プロジェクトチーム

目次

1　鋼橋の劣化と延命化方策　4-1
1.1　床版疲労損傷　4-1
1.2　セキュリティシステムの構築　4-1

2　モニタリングの実装に関する検討　4-2
2.1　対象橋梁　4-2
2.2　モニタリングの概要　4-3

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　4-6
4.1　システム構成　4-6
4.2　光ファイバ通信による遠隔地での測定　4-7

5　モニタリング状況　4-8
5.1　FBG 方式　4-8
5.2　OSMOS 方式　4-11

6　今後の展開　4-12

1　鋼橋の劣化と延命化方策

1.3　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．

本年度の WG4 では，鋼橋コンクリート床版の疲労劣化を対象とし，実装したモニタリングデータの評価とセンサス活用の適用性について検討を行った．

1.4　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 4-2** に示す．

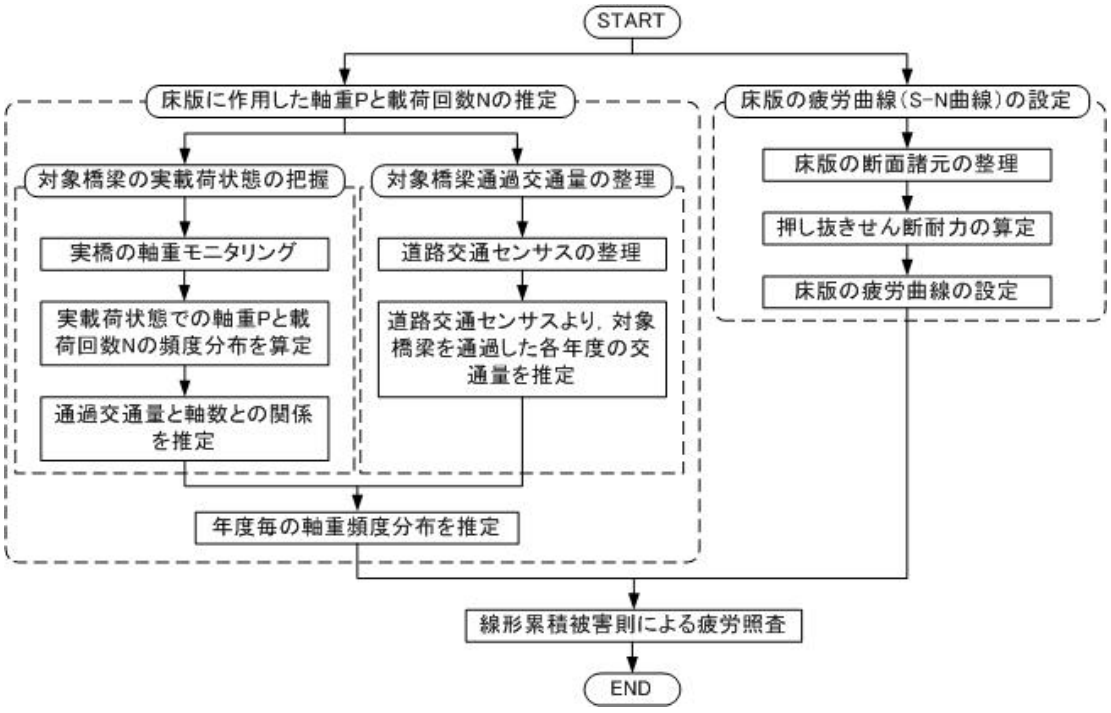


図 4-1　評価フロー

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．

2　モニタリングの実装に関する検討

2.1　対象橋梁

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** に，外観を**図 4-2** に示す．

表 4-1　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 4-2　U 橋の外観

2.2　モニタリングの概要

U 橋におけるモニタリング計画を**図 4-3** 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，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 4-4**，**図 4-5** 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，平成 19 年度よりモニタリングを実施している．

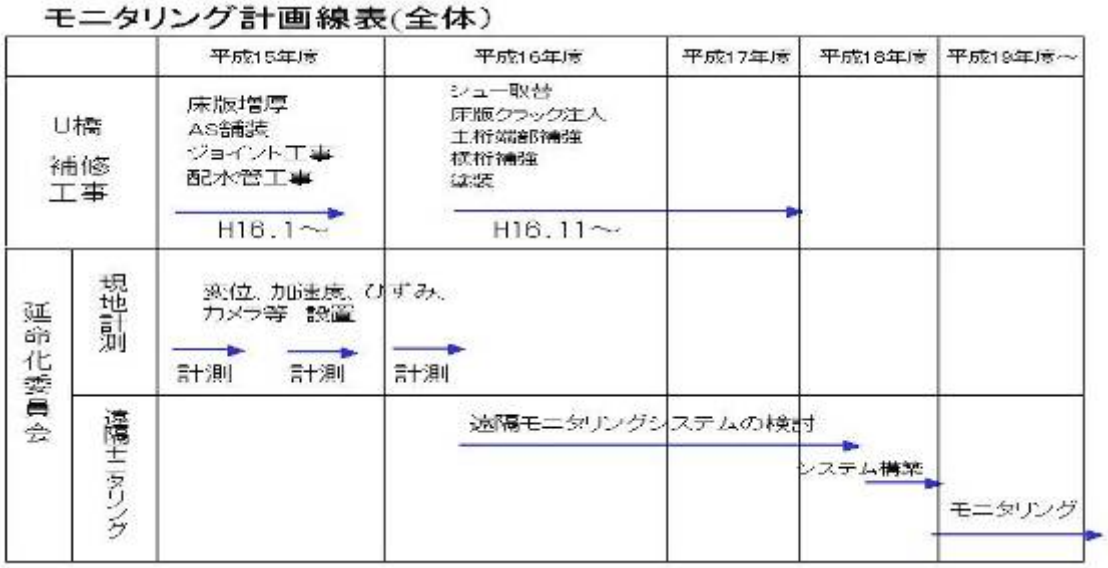


図 4-3　U 橋におけるモニタリング計画

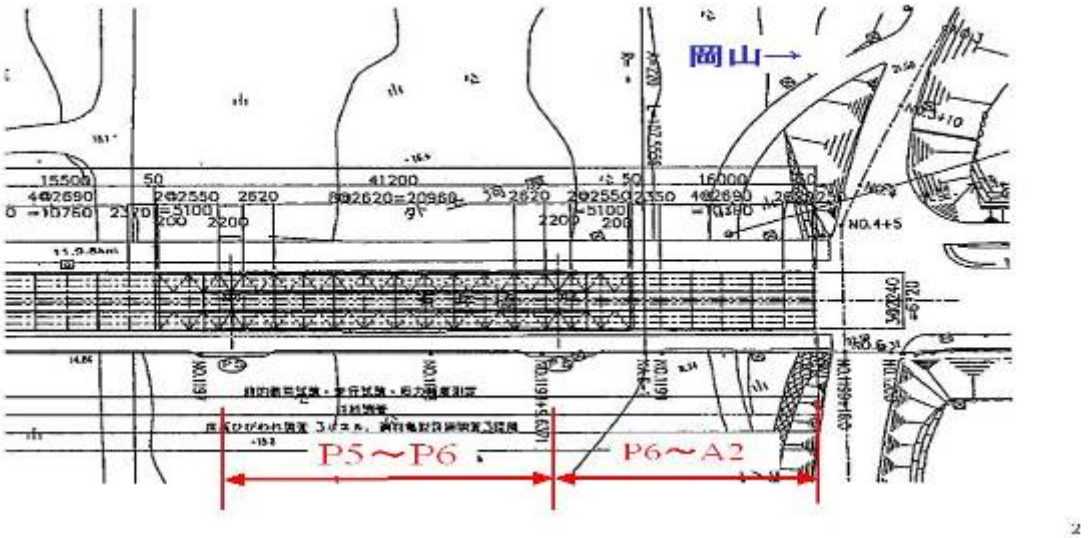


図 4-4　U 橋の計測区間（平面図）



図 4-5　U 橋の計測区間（側面図）

3　測定技術

U 橋のモニタリングでは，ひずみ計，変位計，加速度計等を設置している．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** に示す．

表 4-3　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 4-6**）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。



(a) 無線センサ



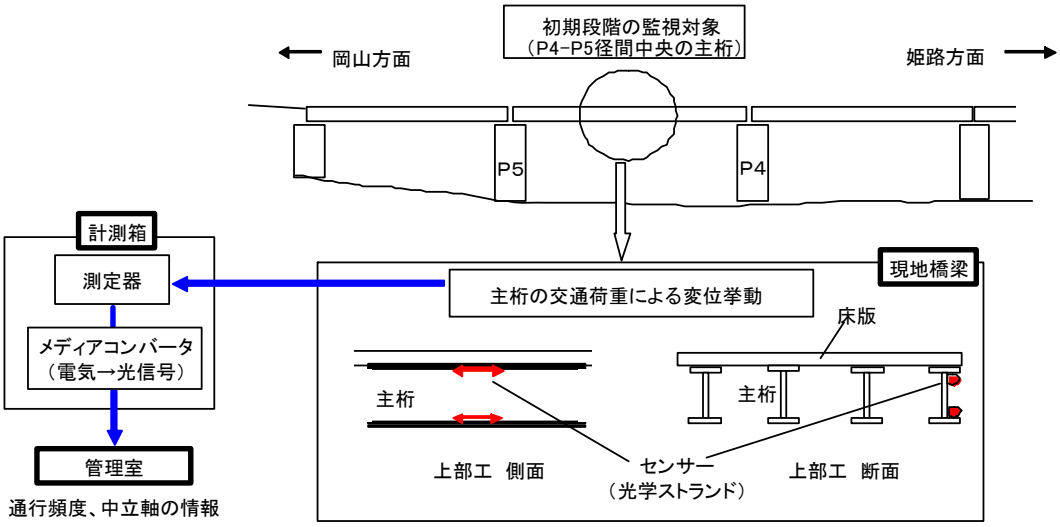
(b) 設置状況

図 4-6　無線センサ計測システム

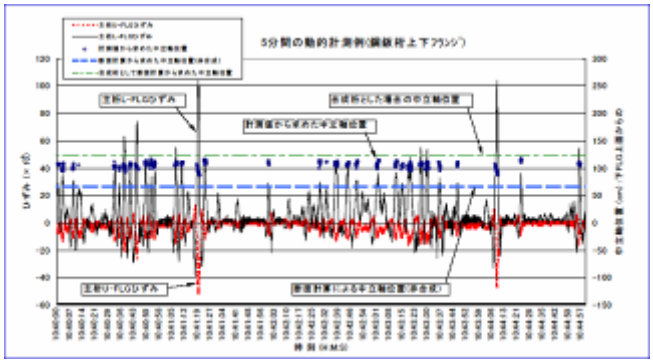
3.2　変位計測

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 4-7)．



(a) モニタリングの概要



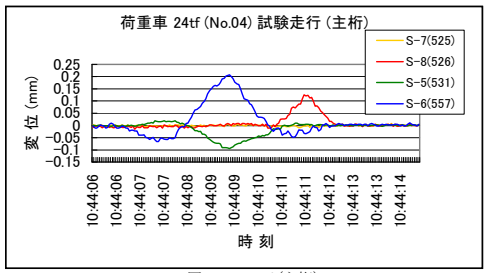


図-1-1　24tf (主桁)

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 4-7　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　システム構成

遠隔モニタリングにおける計測システムを**図 4-8** に、概要を**図 4-9** 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も配信できるシステムである。

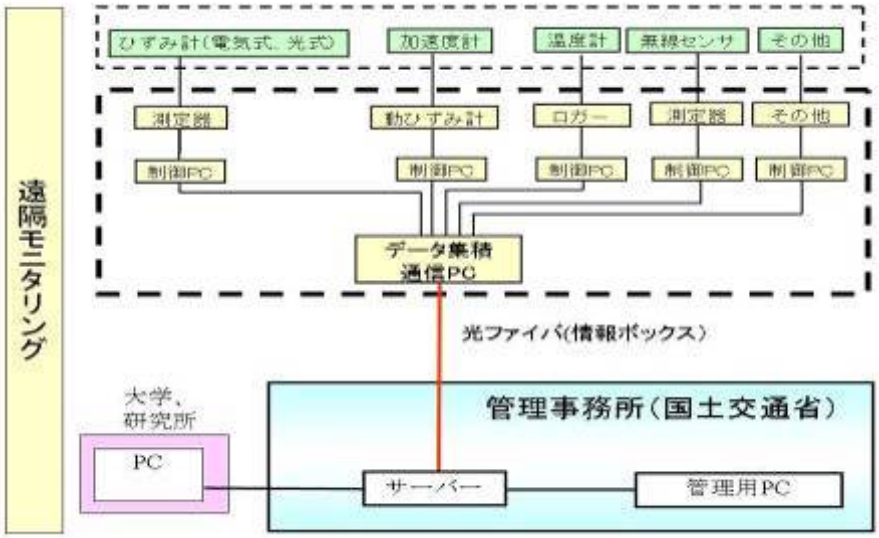


図 4-8　遠隔モニタリングシステム

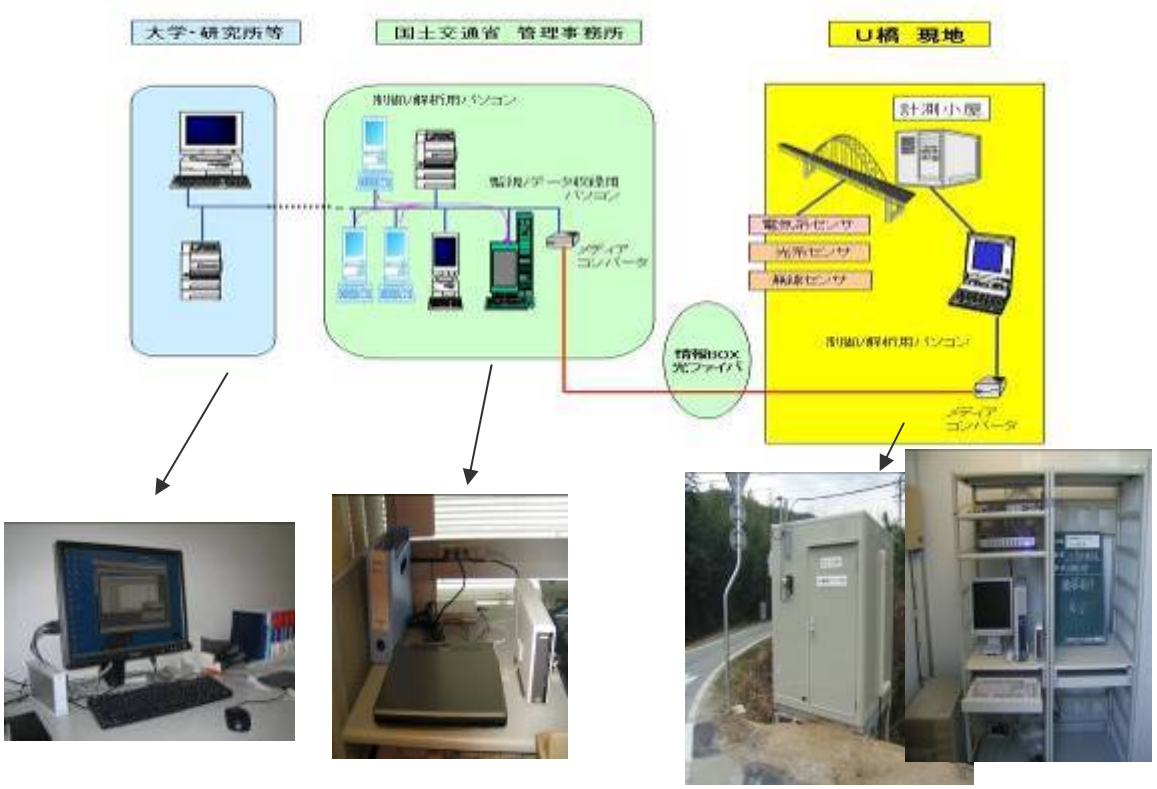


図 4-9　遠隔モニタリング概要

4.2　光ファイバ通信による遠隔地での測定

図 4-10 に，光ファイバ通信を利用したシステムの詳細を示す．

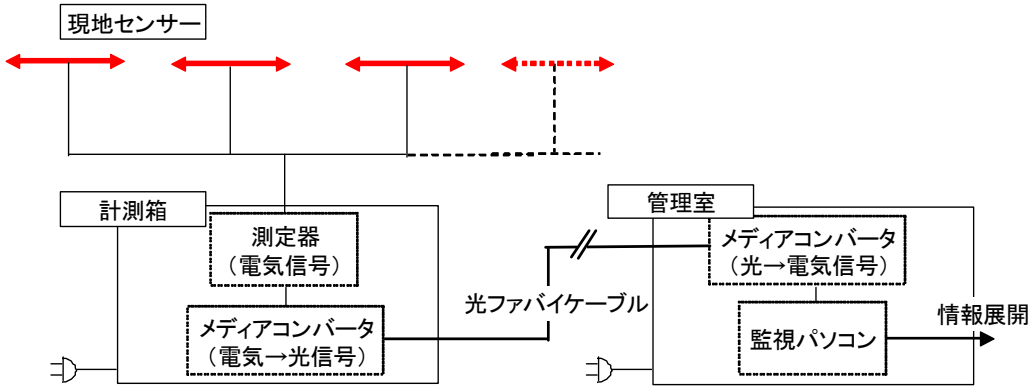


図 4-10　光ファイバ通信の詳細

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．

図 4-11 に管理画面の一例を示す．

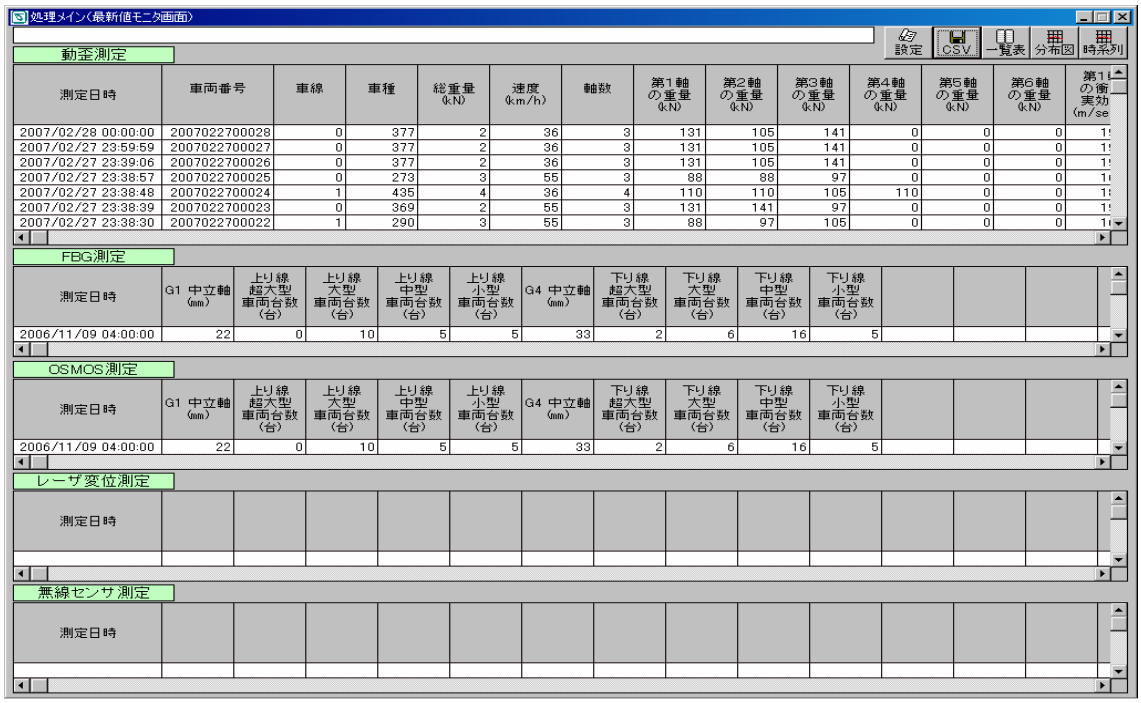
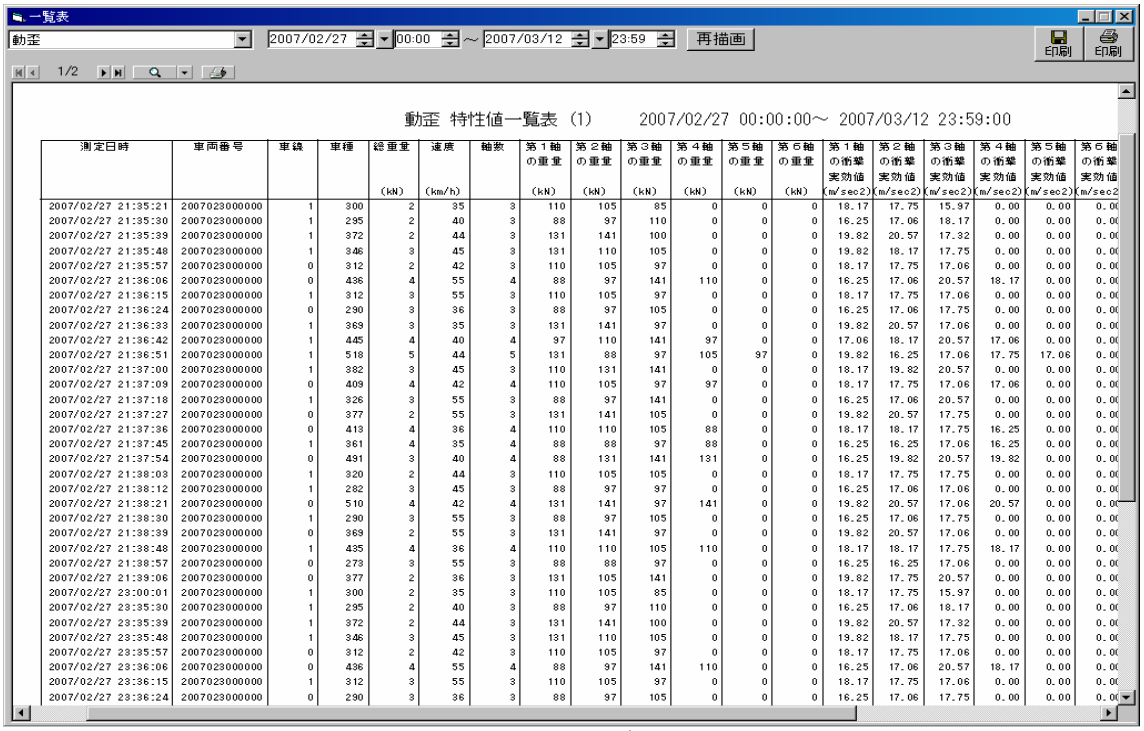


図 4-11　（a）モニタリング監視画面 その１



測定日時	車両番号	車線	車種	総重量 (kN)	速度 (km/h)	軸数	第１軸の重量 (kN)	第２軸の重量 (kN)	第３軸の重量 (kN)	第４軸の重量 (kN)	第５軸の重量 (kN)	第６軸の重量 (kN)	第１軸の衝撃実効値 (m/sec2)	第２軸の衝撃実効値 (m/sec2)	第３軸の衝撃実効値 (m/sec2)	第４軸の衝撃実効値 (m/sec2)	第５軸の衝撃実効値 (m/sec2)	第６軸の衝撃実効値 (m/sec2)
2007/02/27 21:35:21	2007023000000	1	300	2	35	3	110	105	85	0	0	0	18.17	17.75	15.97	0.00	0.00	0.00
2007/02/27 21:35:30	2007023000000	1	295	2	40	3	88	97	110	0	0	0	16.25	17.06	18.17	0.00	0.00	0.00
2007/02/27 21:35:39	2007023000000	1	372	2	44	3	131	141	100	0	0	0	19.82	20.57	17.32	0.00	0.00	0.00
2007/02/27 21:35:48	2007023000000	1	346	3	45	3	131	110	105	0	0	0	19.82	18.17	17.75	0.00	0.00	0.00
2007/02/27 21:35:57	2007023000000	0	312	2	42	3	110	105	97	0	0	0	18.17	17.75	17.06	0.00	0.00	0.00
2007/02/27 21:36:06	2007023000000	0	436	4	55	4	88	97	141	110	0	0	16.25	17.06	20.57	18.17	0.00	0.00
2007/02/27 21:36:15	2007023000000	1	312	3	55	3	110	105	97	0	0	0	18.17	17.75	17.06	0.00	0.00	0.00
2007/02/27 21:36:24	2007023000000	0	290	3	36	3	88	97	105	0	0	0	16.25	17.06	17.75	0.00	0.00	0.00
2007/02/27 21:36:33	2007023000000	1	369	3	35	3	131	141	97	0	0	0	19.82	20.57	17.06	0.00	0.00	0.00
2007/02/27 21:36:42	2007023000000	1	445	4	40	4	97	110	141	97	0	0	17.06	18.17	20.57	17.06	0.00	0.00
2007/02/27 21:36:51	2007023000000	1	518	5	44	5	131	88	97	105	97	0	19.82	16.25	17.06	17.75	17.06	0.00
2007/02/27 21:37:00	2007023000000	1	382	3	45	3	110	131	141	0	0	0	18.17	19.82	20.57	0.00	0.00	0.00
2007/02/27 21:37:09	2007023000000	0	409	4	42	4	110	105	97	97	0	0	18.17	17.75	17.06	17.06	0.00	0.00
2007/02/27 21:37:18	2007023000000	1	326	3	55	3	88	97	141	0	0	0	16.25	17.06	20.57	0.00	0.00	0.00
2007/02/27 21:37:27	2007023000000	0	377	2	55	3	131	141	105	0	0	0	19.82	20.57	17.75	0.00	0.00	0.00
2007/02/27 21:37:36	2007023000000	0	413	4	36	4	110	110	105	88	0	0	18.17	18.17	17.75	16.25	0.00	0.00
2007/02/27 21:37:45	2007023000000	1	361	4	35	4	88	88	97	88	0	0	16.25	16.25	17.06	16.25	0.00	0.00
2007/02/27 21:37:54	2007023000000	0	491	3	40	4	88	131	141	131	0	0	16.25	19.82	20.57	19.82	0.00	0.00
2007/02/27 21:38:03	2007023000000	1	320	2	44	3	110	105	105	0	0	0	18.17	17.75	17.75	0.00	0.00	0.00
2007/02/27 21:38:12	2007023000000	1	282	3	45	3	88	97	97	0	0	0	16.25	17.06	17.06	0.00	0.00	0.00
2007/02/27 21:38:21	2007023000000	0	510	4	42	4	131	141	97	141	0	0	19.82	20.57	17.06	20.57	0.00	0.00
2007/02/27 21:38:30	2007023000000	1	290	3	55	3	88	97	105	0	0	0	16.25	17.06	17.75	0.00	0.00	0.00
2007/02/27 21:38:39	2007023000000	0	369	2	55	3	131	141	97	0	0	0	19.82	20.57	17.06	0.00	0.00	0.00
2007/02/27 21:38:48	2007023000000	1	435	4	36	4	110	110	105	110	0	0	18.17	18.17	17.75	18.17	0.00	0.00
2007/02/27 21:38:57	2007023000000	0	273	3	55	3	88	88	97	0	0	0	16.25	16.25	17.06	0.00	0.00	0.00
2007/02/27 21:39:06	2007023000000	0	377	2	36	3	131	105	141	0	0	0	19.82	17.75	20.57	0.00	0.00	0.00
2007/02/27 23:00:01	2007023000000	1	300	2	35	3	110	105	85	0	0	0	18.17	17.75	15.97	0.00	0.00	0.00
2007/02/27 23:35:30	2007023000000	1	295	2	40	3	88	97	110	0	0	0	16.25	17.06	18.17	0.00	0.00	0.00
2007/02/27 23:35:39	2007023000000	1	372	2	44	3	131	141	100	0	0	0	19.82	20.57	17.32	0.00	0.00	0.00
2007/02/27 23:35:48	2007023000000	1	346	3	45	3	131	110	105	0	0	0	19.82	18.17	17.75	0.00	0.00	0.00
2007/02/27 23:35:57	2007023000000	0	312	2	42	3	110	105	97	0	0	0	18.17	17.75	17.06	0.00	0.00	0.00
2007/02/27 23:36:06	2007023000000	0	436	4	55	4	88	97	141	110	0	0	16.25	17.06	20.57	18.17	0.00	0.00
2007/02/27 23:36:15	2007023000000	1	312	3	55	3	110	105	97	0	0	0	18.17	17.75	17.06	0.00	0.00	0.00
2007/02/27 23:36:24	2007023000000	0	290	3	36	3	88	97	105	0	0	0	16.25	17.06	17.75	0.00	0.00	0.00

図 4-11　(b) モニタリング監視画面　その 2

5　モニタリング状況

5.1　FBG（Fiber　Bbragg　Grating）方式

光ファイバの長手方向のある一定部分に、等間隔に断面の屈折率が異なる部分（グレーティング）を設けることにより、ブラッグ波と称する反射光が発生する。この反射光は、グレーティング部分の伸縮量に比例して波長がシフトする。この波長シフト量を計測することにより、歪みが測定でき、動的な計測も可能なシステムである。

FBG センサについては、**図 4-4** に示す P6～A2 橋脚間のゲルバー桁中央部のウェブ上下に**図 4-12** に示すように設置した。測定したひずみデータの一例を**図 4-13** に示す。下側のセンサが凸のようなピークを示すが、これは、車両の通行に伴って発生するものである。このため、**図 4-14** に示すように、このピーク値とその発生時間のみを抽出するよう、計測したデータの処理を行うようにした。

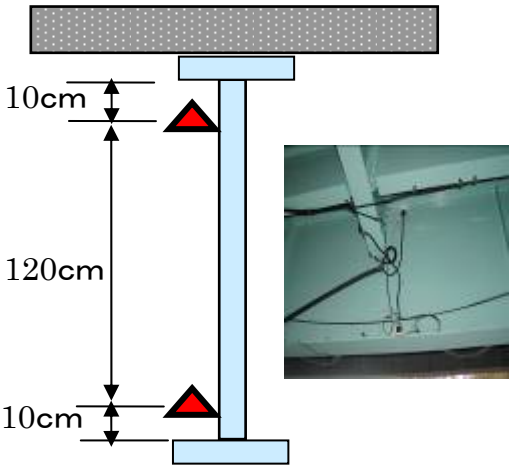


図 4-12　FBG センサ

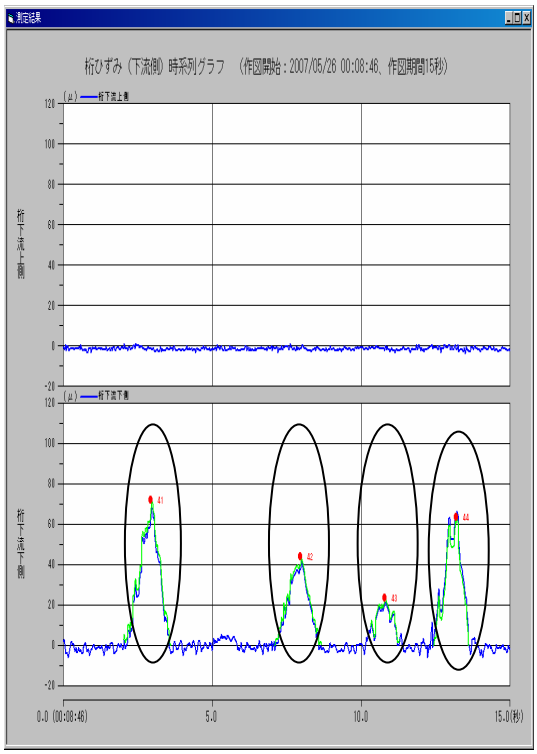


図 4-13　FBG 計測データ

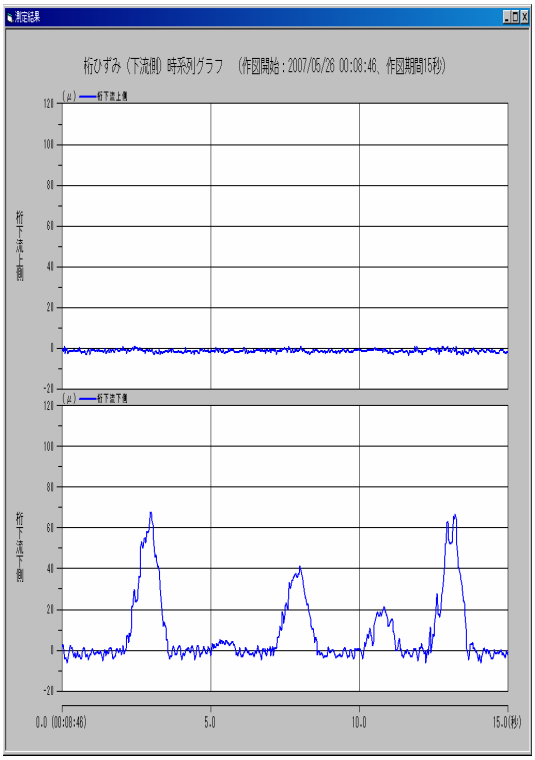


図 4-14　ひずみピーク抽出

計測データには歪のピークが低い場合があるが、低速車や軽自動車などの走行と考えられる。今後は、発生するひずみと車両の通行状況の相関を、基準車を走行させるなどしてよりモニタリングの精度を高めたいと考えている。

また、中立軸については、ほぼ、上部センサ位置付近となっているため、ひずみのピーク、特に圧縮側のひずみが顕著に発生していない状況にある。このため、さらにデータの変化を監視し、中立軸の経時変化を確認したいと考えている。

図 4-15 には、下り車線における、平成 19 年 5 月 19 日～5 月 29 日の曜日別のピーク出現回数を示す。平日と土日では、ピーク出現回数に差があり、土曜がほぼ平日の 6 割、日曜が平日のほぼ 4 割となっている。これは、現在までの計測結果をみると、ほぼ毎週、同様の傾向が見られている。

図 4-16 には、平日 5 日分を累計した時間毎のピーク出現回数を示す。
ピーク出現回数は、昼間の 12 時～17 時で最大となり、早朝の 6 時～8 時では最小となる。深夜帯（0 時～5 時）においても極端にピーク出現が減少することはなく、昼間帯の 70～80%前後で推移している。また、昼間帯ではあまり測定されない大きなひずみが、深夜に計測される頻度が高くなることも判明している。

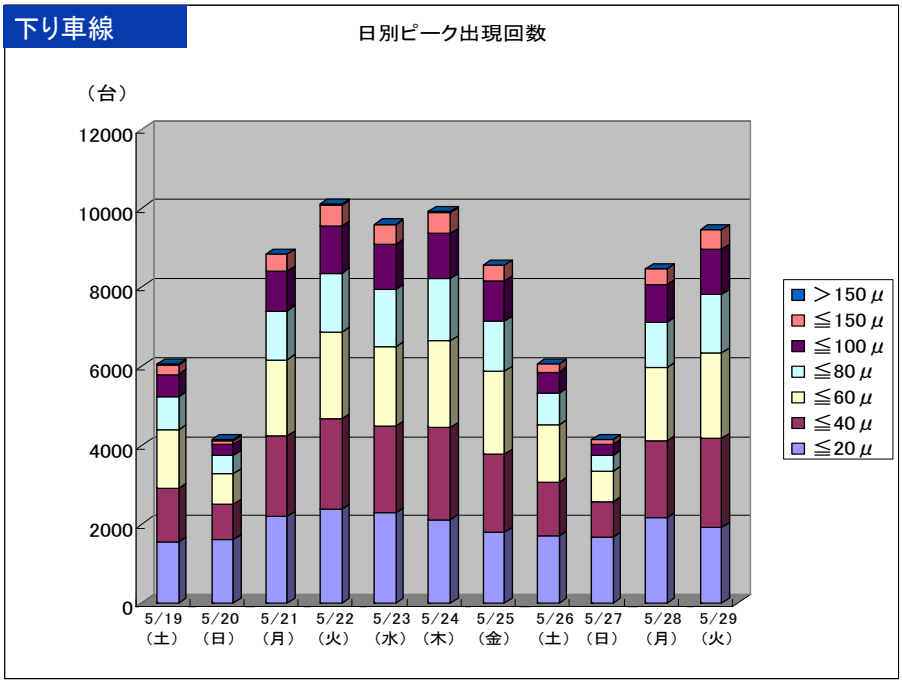


図 4-15　　ひずみピーク出現回数（曜日別）

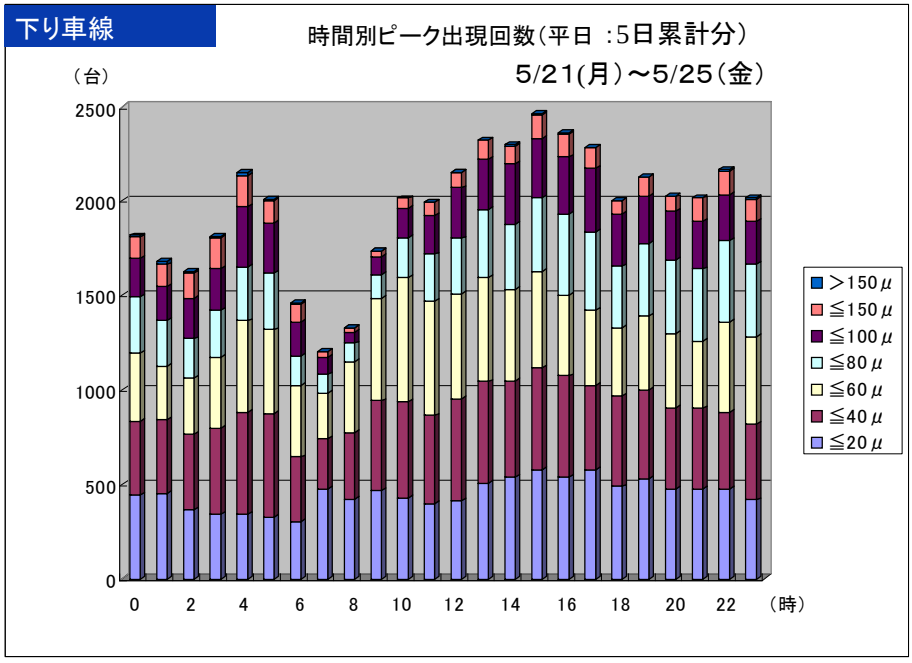


図 4-16　　ひずみピーク出現回数（時間別　平日）

5.2　OSMOS 方式

次に OSMOS により収録および解析された交通車両の統計データを示す．まず 5 月～12 月までの半年分に及ぶ上下線の通過車両の推移を**図 4-17** に示す．また詳細なデータの一例として，6 月一ヶ月間の推移を別途**図 4-18** に示す．図より，以下の点が考察される．

1)　再現性

図 4-17 より半年のデータを通じほぼ一週間毎の再現性が確認され，土日に 5t 以上の重量車両の台数が減少している．5t 以上の車両は商用車量と推定されるため，土日に通過台数が減少していると考えられる．また 8 月 15 日付近には，お盆の連休があるため，この週に通過台数が減少している．

図 4-18 より，上り線において，重量車両については，深夜をピークとして 24 時間の再現性を確認できる．また最も通過車両の少ない時間帯は朝方であった．ただし軽量車両についてはほぼ変化がない．これに対し下り線では，同様に 24 時間の再現性を確認できるとともに，朝方の通過台数が最も少ない．しかし，10t 以上の車両については午前 11 時ごろをピークとし，5～10t の車両についてはほぼ横這いの数値となっている．これは，上りと下りで輸送サイクルが若干異なることが原因であると考えれれる．

1)　上下線の差異

上り車線では，10t 以上の車両と 5～10t の車両の通過台数がほぼ同一である．これに対し，下り車線では，5～10t の車両が 10t 以上の車両に比べて多く，また 2.5t 以下の車両も多く存在している．これは，上り方面に物資を運搬した車両が目的地で荷降ろしを行い，軽量化して帰路に通過しているものと推察される．

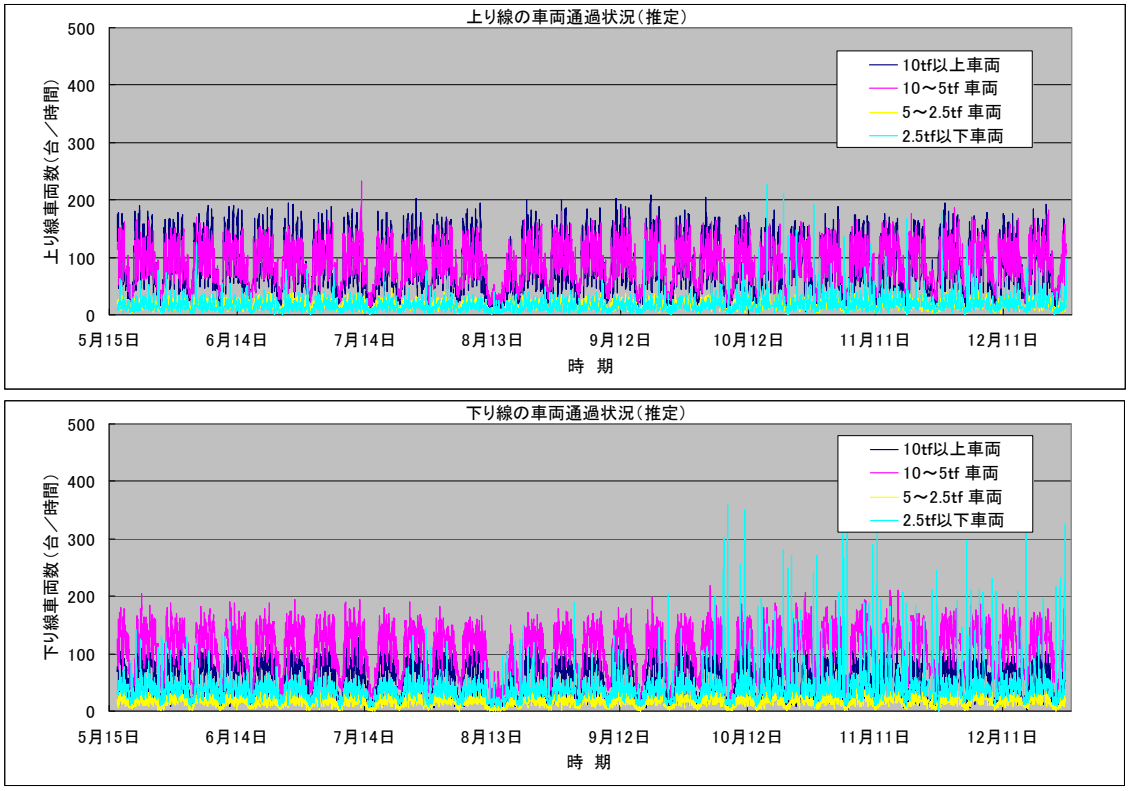


図 4-17　上下線の車両通過状況（半年）

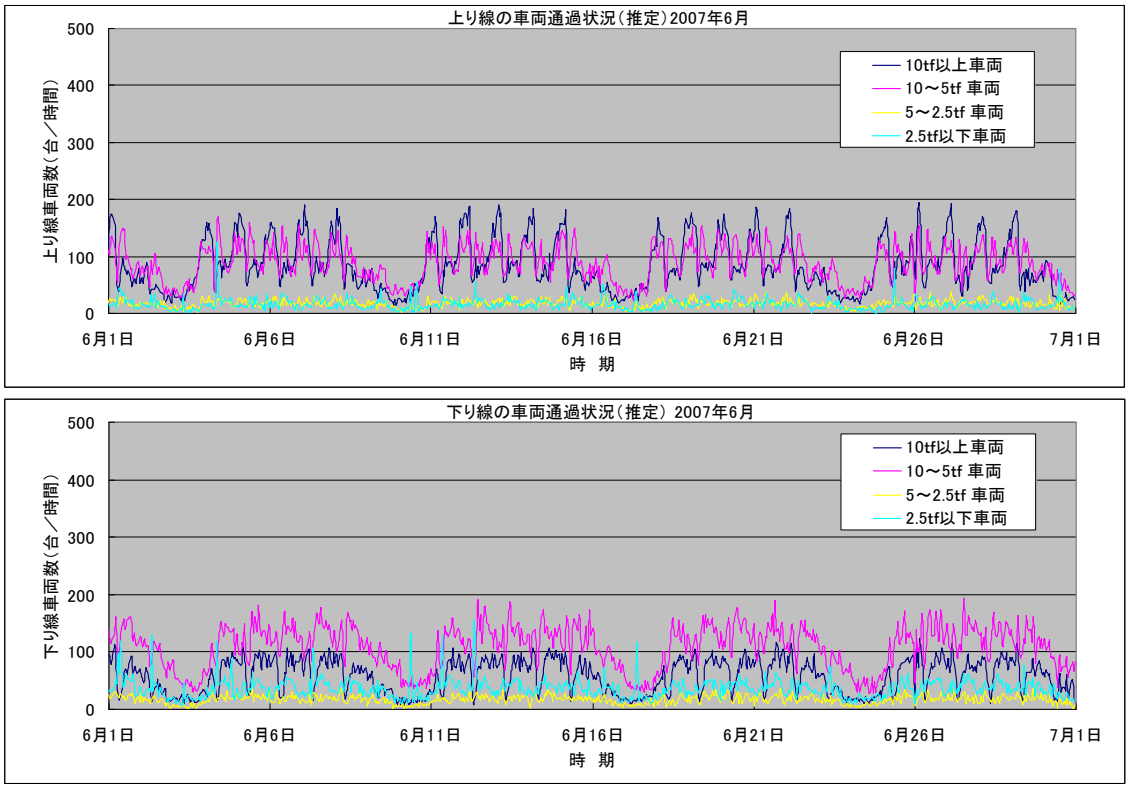


図 4-18　上下線の車両通過状況（6 月一ヶ月間）

このことより，上下線の通過車両台数がほぼ同じであっても，車両重量が異なる可能性があることがわかった．しかし半年の間，ある単位で同様の周期を繰り返していることがわかり，年間の通過車両を短期間のデータで再現することが可能であることが示唆されている．

次に主桁中立軸位置の推移を図 4-19 に示す．上り線側の外桁での中立軸位置は，下り線の外桁での中立軸位置よりも低くなっている．これは，重量車両の通過台数が下りに比べのぼりが大きいことなどから，非合成化が進んでいると考えることができる．ただし，疲労損傷で中立軸位置変化が有意に発生するか否かを今後検討する必要がある．

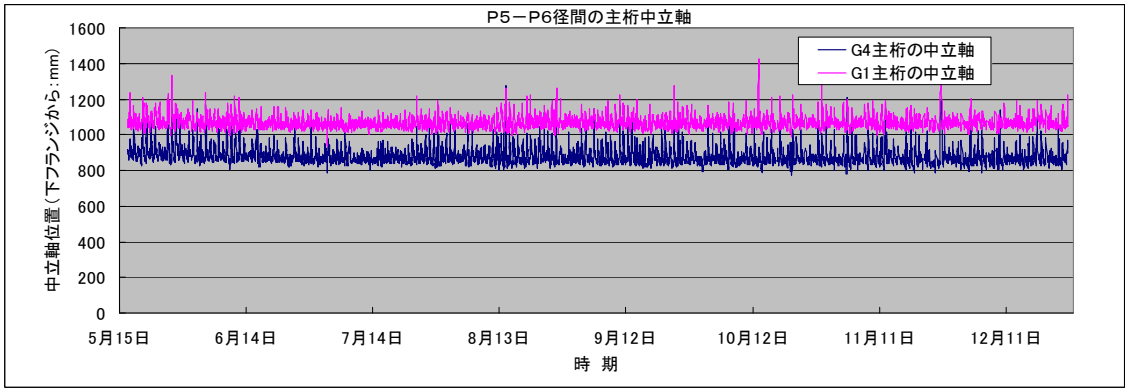


図 4-19　上下線外桁での中立軸位置推移（半年）

6　今後の展開

初年度の実施したモニタリングデータの解析結果により，交通センサスデータ活用の可能性が示された．次年度以降では，交通センサスデータの整合性を評価するとともに，モニタリング対象橋梁以外の劣化評価を行うことを検討する予定である．