

## 研究展望

# 維持管理に関する研究展望

## RESEARCH ACTIVITIES ON MAINTENANCE OF CONCRETE STRUCTURES

関 博\*

Hiroshi SEKI

\*正会員 工博 早稲田大学理工学部土木工学科教授  
(〒169 東京都新宿区大久保 3-4-1)

**Key Words** : codes, system on maintenance, estimation of service life, inspection, rehabilitation

### 1. まえがき

従来、コンクリート構造物はメンテナンスフリーであり、建設後は半永久的にその機能を保持し得ると考えられてきた。確かに明治時代に建設された構造物が現在でも活用されている例も多い。たとえば、小樽港の防波堤のコンクリートブロックはその代表的な例であり、同時に製作された供試体によるほぼ 100 年に亘る試験結果などからも適切な材料を使用し、適切な施工を実施することによりコンクリートそのものが極めて耐久性に優れた構造材料であることを示している<sup>1)</sup>。

一方では、不適切な材料の使用、配合や施工の不適切、供用施設を取巻く自然環境の苛酷さ、荷重・外力条件の変化などにより、構造体に変状を来たし当初の機能が低下してなんらかの対策を迫られる例も稀ではない。これらの変状には、当初設計や施工段階で予測し得なかった事例も数多く含まれていると思われる。土木技術者がコンクリートを主体として構造体を構築するようになってからただか 1 世紀程度であり、地球環境の基で長年月に亘る耐久性を保証されたものではない。このような観点からは、コンクリート構造物は基本的にはその性能は年月と共に低下するもの、所要の性能を保持させるためには維持管理を行うべきものとする考えが妥当と思われる。

構造物の性能は図-1 のように分類できる<sup>2)</sup>。本図では、構造物の性能を機能に関するもの（特に、設計で重要視しているのは耐荷性である）、周辺環境に影響を及ぼすもの、耐久性に関係するものの 3 種に分けている。前者はある時点における性能であり、最後の耐久性は時間経過による機能の低下や周辺環境への影響の増加を考えている。すなわち、耐久性は現時点では性能に支障を

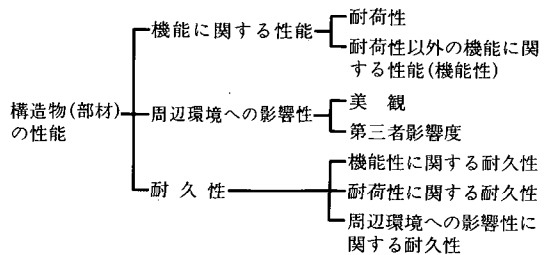


図-1 構造物(部材)の性能の分類<sup>2)</sup>

生じないが、経年と共に性能低下を考慮しなければならない項目である。このように、維持管理では現時点での対策だけでなく、耐久性を念頭におくと将来予測による性能低下に対応した対処も必要となるのである。

コンクリート構造体の変状を考えると、次の諸点も念頭におく必要がある。すなわち、

#### ① 構造体の種類

コンクリートそのものの変状 (材料的)  
RC・PC 部材の変状 (部材レベル)  
構造物としての変状 (構造物レベル)

#### ② 変状を生じさせる時間経過

常時に徐々に変状を生じさせるもの  
災害 (地震, 火災) などによるもの

#### ③ 変状を生じさせる原因

物理的原因

荷重・外力の変化  
疲労, 凍害 など

化学的原因

内部鋼材の腐食, 中性化  
アルカリ骨材反応,

## コンクリートの化学的腐食 など

本文では、②の異常時の原因によるもの（上記の災害による変状）は含めていない。また、①の構造物レベルや③の荷重・外力の変化についてはほとんど触れておらず、主に、これらを除いた項目を念頭において本文をまとめることとする。いずれにせよ、総合的な維持管理を実施するためには、次の内容が含まれる必要がある。

- ①構造部材の性能の劣化予測
- ②点検や調査の方法
- ③劣化度の評価や判定の方法
- ④補修・補強などの対策方法

## 2. 維持管理の基準類

各種学協会や公的機関における、コンクリート構造物の維持管理のための基準類を以下に記述することとする。その性格上、公的機関の基準類は実務的である。

- (1) コンクリート構造物の維持管理指針(案)(土木学会)<sup>2)</sup>(95年10月)

コンクリート構造物(主に部材)の維持管理を行うための基本的な考え方をまとめたものであり、劣化予測、点検、評価および判定、対策、補修・補強、記録の方策が示されている。

- (2) 建築物の調査・劣化診断・修繕の考え方(案)・同解説(日本建築学会)<sup>3)</sup>(88年)

既存の建築物に関連し、劣化の調査や判断、対策などがまとめられている。維持管理そのものについては、別途指針作成の作業が進められている。

- (3) コンクリートのひびわれ調査、補修・補強指針(JCI)<sup>4)</sup>(87年2月)

コンクリート部材表面に生じたひびわれに関して、調査方法、原因推定、補修の要否の判断、補修や補強方法などについてまとめている。指針中の“表-2 補修の要否に関するひびわれ幅の限度”は実務でも活用されている。

- (4) アル骨診断、補修ガイドライン(JCI)<sup>5)</sup>(89年7月)

アルカリ骨材反応に関する調査報告書であり、“アルカリ骨材反応により損傷を受けたコンクリート構造物の診断、補修ガイドライン(案)”が提示されている。

- (5) 塩害補修指針：アル骨補修・補強指針(建設省)<sup>6)</sup>(88年11月)

報告書は第一編および第二編より構成され、第二編では、“塩害を受けた土木構造物の補修指針(案)”、“アルカリ骨材反応被害構造物(土木)の補修・補強指針(案)”を提示している。

- (6) 劣化防止・補修マニュアル(沿岸センター)<sup>7)</sup>(89年9月)

港湾構造物を対象として、既設構造物における劣化

防止のための材料の選定、設計・施工上の対策をまとめると共に、塩害で劣化した構造物の補修対策をまとめており、実務で活用されている。さらに、既往の補修実績を踏まえて栈橋に対し、表面塗装による内部塩化物の再分布なども考慮した新たな考え方による対策にも応用されている<sup>8)</sup>。

- (7) 構造物保守管理の標準・同解説(鉄道総研)<sup>9)</sup>(87年9月)

コンクリート構造物の維持管理のための標準的方法がまとめられており、検査手法、健全度の判定、補修・補強方法、構造物の安全性評価方法などが示されている。

- (8) 維持修繕要領(日本道路公団)<sup>10)</sup>(88年5月)

鋼橋鉄筋コンクリート床版などを対象とし、橋梁の劣化調査、補修工法の選定、補修工についてまとめており、床版の耐荷力の保持、コンクリート片の落下防止などを意図している。

- (9) 道路構造物の補修要領(阪神高速道路公団)<sup>11)</sup>(90年6月)

コンクリート構造物の補修・補強、修景、改良に適用するもので、RC床版の鋼板圧着、表面保護工、橋脚の補修などが示されている。

- (10) 既設道路橋の補修・補強の手引き(首都高速道路公団)<sup>12)</sup>(93年7月)

コンクリート道路橋に関して、鋼板接着、FRP接着、増厚などの補修・補強方法がまとめられている。

## 3. 維持管理システムに関する研究の現況

- (1) 維持管理の区分に対する考え方

人工の物を常時所要の性能を発揮させるための方策は、管理の容易さ、物の大きさ、交換物の保管の容易さ、工場製品か否か、などによって相違している。通常身近にある電気製品では故障が生じた場合、修理にエネルギーを費すよりも新品との交換としていることが多い。飛行機や車両では常時の検査と共に所定の供用時間ごとに部品の一部を交換している<sup>13)</sup>。コンクリート構造物は、一般に個々の仕様に応じた現場生産であり、工業製品とは維持管理システムも当然異なる方式となるであろう。ただし、構造体を構成する部材レベルでは若干の相違を考えることも可能であり、たとえば主要部材と副次部材で設計年数を変えることも考えられる。

構造物の健全度は、①まったく支障がなく健全な状態、②表面的には健全と見られるが劣化が内部で既に進行している状態、③劣化が顕在化し性能低下を生じている状態、に大別される。従来の維持管理は③に達した状態でなんらかの対策が取られてきたが、構造物によっては①や②の段階でも維持管理が求められる趨勢と思われる。

①や②は予防保全であり、③は事後保全といわれ、維持管理体制も相違することになる。維持管理指針(案)<sup>2)</sup>では、これらをA:予防維持管理、B:事後維持管理、C:観察維持管理、D:無点検維持管理の4種に分類し、構造物あるいは部材の重要度、第3者影響度、供用期間、環境条件さらには維持管理の難易度を考慮して管理のレベルを定めるとしている。

## (2) トータルコストと維持管理

構造物が所要の供用期間に定められた性能を常時発揮するためには、供用期間でのトータルコストを考える必要がある。これらは、①建設時の費用(調査、設計、建設に費される費用など)、②維持管理の費用(点検に要する費用、補修・補強・解体撤去などに要する費用など)などであり、現状は①のみを基として建設のコストが定められている。

維持管理のコストをトータルで考える手法として、宮本は Bridge Management System (BMS)<sup>14)</sup>の導入を提唱している<sup>14)</sup>。BMSは最も効率的な維持管理計画の作成を支援するシステムと位置づけられ、道路網の現状分析や将来予測、健全度判定(損傷判定、寿命予測など)、補修費用の検討、資金計画などを通して、合理的な保守や管理計画の立案と実行を支援することを意図するもので、わが国でも一部検討が進められている。また、松島ら<sup>15)</sup>は定期点検の最適検査間隔を補修費用および損失費用と検査費用のトレード・オフの問題と考え、期待費用最小の方法により定量的に求めることを試みている。

## (3) 維持管理と不確実性

構造物の維持管理を実施するにあたって、種々の不確実な状況に直面することが多い。これらにはたとえば、劣化指標の選定、劣化の程度およびその判定、劣化と性能低下の判定、構造寿命の推定などがある。4以降ではこれらのハードな取り組みを記述するが、不確実性をベースとして維持管理を明確化する試みもなされている。

主観的不確実性を数学的に取り扱う方法としてファジイ集合の概念が提唱され、この概念に基づき白石ら<sup>16),17)</sup>はコンクリート床版の劣化レベルの判断にファジイ理論を適用し、損傷モードおよび劣化レベルを推定するエキスパートシステムを提案している。宮本ら<sup>18),19)</sup>もコンクリート橋を対象として健全度評価を行うためにファジイ理論を適用している。松島ら<sup>20)</sup>はコンクリート構造物の目視調査結果による劣化診断にファジイ理論を適用し、劣化評価を行う方法を提案している。宮本ら<sup>21),22)</sup>は動的載荷試験や材料試験を用いた損傷評価により橋梁全体系の安全性を検討している。古田ら<sup>23)</sup>はデータの増加に伴う知識ベースの改良・保守の効率的な手法としてファジイ

理論の応用を考えている。また、不確実性に対して確率論を導入した手法には、塩害を扱った桜井ら<sup>24)</sup>や中性化を扱った和泉<sup>25)</sup>の方法がある。

## 4. コンクリート構造物の寿命推定と維持管理

### (1) 構造寿命の設定

#### a) 供用年数の設定

構造物が所要の性能を保持し得る期間(供用期間)は、一般に次の条件から定まる。すなわち、①物理的条件(物理的あるいは化学的作用などにより劣化が進行し所要の性能を保持することが不可能となる場合)、②機能に関する条件(機能変更、機能向上を目的として、構造物の大幅な改良や撤廃を行う場合)、③経済的条件(ある時点で構造物の改廃を行うことが経済的に有利と判断される場合)、などである。通常、建設時には②や③の条件を予測することは不可能で①の条件を想定し

設計供用期間<設計耐久期間

とする必要がある。なお、ここで設計耐久期間とは設計時において安全率を考慮して物理的条件から所要の性能を保持し得る期間である。

各期準類で記述している供用年数に関して、考え方の根拠は必ずしも一致していない<sup>26)</sup>。荷重・外力の再現期間を考慮して風荷重に対して50年(道路橋示方書・同解説)、環境荷重として100年(DNVの基準)と規定しているものもある。また、国有財産の減価償却から耐用年数として次を定めているものもある(大蔵省令第15号)。すなわち、橋梁15年、トンネル60年、まくら木20年としている。物理的な耐用年数を考慮していると考えられるものでは(港湾関係補助金等交付規則実施要領)、岸壁・防波堤・さん橋50年、橋梁60年としている。

一般的には、橋梁の設計供用年数は50年程度と考えられるようである。ヨーロッパの橋梁関係者は、構造物の寿命は50~100年程度と考えているようである。また、部材の種類によって供用年数を変えるべきとして、たとえば、交換可能な部材で5~35年程度、交換不可能な部材で20~120年程度とする考えもある<sup>26)</sup>。

#### b) 構造寿命の推計

構造物の寿命を求めるためには、性能要求の明確化(定量化も含めて)、性能低下要因の設定、要因の指標の変化の把握、性能低下限界などを設定しなければならない。また、安全性や機能の低下に対する考え方(たとえば、部分的にはフェールセーフ、部分的損傷に対する扱いなど)もまとめる必要がある。耐久性設計研究委員会(JCI)<sup>13)</sup>では、耐用年数予測のための解析方法、他分野での寿命予測、劣化指標の予測モデルなどを報告書でまとめている。この方面でのコンクリート構造物に関する研究は少ないが、たとえば、宮本ら<sup>27)</sup>は既存構造物の評価

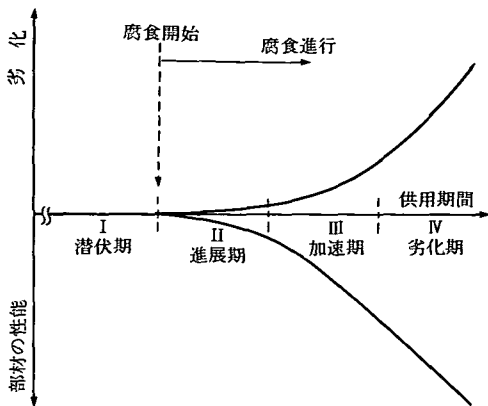


図-2 劣化過程と構造物の性能低下<sup>2)</sup>

データを統計解析することにより安全性の経年変化を推定し、技術者の診断結果と対応させた余寿命評価法を提案している。また、累積ハザード法を適用した既存施設の余寿命推定に関する報告もある<sup>28)</sup>。

## (2) 劣化要因と寿命推定

### a) 塩害と寿命推定

1) 劣化と性能低下：塩害はコンクリートの使用材料中に存在する塩化物(海砂、セメント、混和剤など)、建設後外部から浸透した塩化物(海洋環境から供給されるもの、冬期の融氷塩)などにより内部鋼材が腐食する現象であり、使用材料中の塩化物が適切に規制された状態を前提として海岸環境から供給されるとした研究が圧倒的に多い。この場合の劣化過程は、図-2に示すとおりであり、潜伏期では塩化物がコンクリート中で蓄積しこれが限界量に達すると腐食反応が開始する段階となり、進展期に入ると腐食生成物が徐々に増加する。腐食生成物により膨張ひび割れとして顕在化することになる。研究論文としては、塩化物の浸透、腐食発生限界塩化物量、腐食生成物量とひび割れ解析などに関連するものが多い。

2) 塩化物の浸透と分布：コンクリート中に浸透する塩化物イオンは、主にコンクリート中に存在する水分の移動によるもの、水分中のイオンの濃度差による濃度拡散によるものの2通りが考えられる。Bazántは水分移動や濃度拡散、電気化学的な腐食生成などを考慮した解析を行っており<sup>29),30)</sup>、塩化物の浸透と分布の研究の原点となっている。また、濃度拡散と考えFickの第二法則を適用した初期の論文がBrowneによって発表されている<sup>31)</sup>。わが国の研究では、既存構造物の塩化物測定結果から見かけの拡散係数を提示したもの<sup>32)</sup>、コンクリート表層部分での塩化物の濃縮を考慮して拡散方程式を解いたもの<sup>33)</sup>、塩化物および水分の拡散モデルを設定し塩化物

の状態(可溶性塩分と固定塩分)や乾湿繰返しの影響を考慮し解析したもの<sup>34)</sup>、コンクリート表層部分の塩化物を時間の関数として塩化物濃度分布を解析したもの<sup>35)</sup>、コンクリートの炭酸化によって塩化物の濃縮が生じるとしたもの<sup>36)</sup>、乾燥による水分移動に伴う塩化物イオンの移動を計算したもの<sup>37)</sup>、セメント硬化体の微視的観点から細孔の大きさや帯電の状態とイオンの移動を検討したもの<sup>38)</sup>などがある。

3) 腐食発生限界の塩化物量：鋼材表面に塩化物イオンが蓄積し、不動態皮膜を破壊し腐食反応が開始する塩化物量である。大即ら<sup>39)</sup>はモルタル中鉄筋の不動態皮膜の有無を電気化学的実験により検討し限界塩化物イオン量として $0.75 \text{ kg/m}^3$ (コンクリート $1 \text{ m}^3$ 当り)の値を提示している。宮川は<sup>40)</sup>コンクリート中鉄筋の発錆状態より判定して、限界値として $1.2 \sim 2.5 \text{ kg/m}^3$ の値を報告している。また、既設構造物や供試体での塩化物量と鉄筋腐食の関係から $0.6 \text{ kg/m}^3$ 程度を発錆境界値とする報告もある<sup>6)</sup>。維持管理指針(案)<sup>2)</sup>では、限界塩化物イオン濃度として、 $0.4\%$ (セメント重量に対して、普通ポルトランドセメントで $1.2 \text{ kg/m}^3$ 程度)を与えている。

4) 腐食の支配形態と腐食速度：鋼材のマクロ腐食形態としては、アノード支配、カソード支配、抵抗支配があるが、コンクリート中鋼材では酸素拡散律速のカソード支配と考えられてきた。しかし、供給湿分によってはアノードとカソードを熟知するコンクリートの抵抗支配も想定される<sup>41)</sup>。

アノード支配では、酸素拡散、含水率や分布、アノード・カソード比の時間的変化などを設定する必要がある。酸素拡散に関しては、セメント系材料に関しての研究<sup>42)</sup>、コンクリートでの研究<sup>43)</sup>などがあり、アノード・カソード比に関しては室内実験結果からの逆解析により $C/A = 10 \sim 40$ 程度と考えられる。

5) 腐食生成物とひび割れ発生：鋼材の腐食による膨張圧を求めるためには、錆の種類や物理的特性を明らかにする必要がある。X線回折で主成分は $\text{Fe}_2\text{O}_3$ であることは明らかであるが<sup>44),45)</sup>、物理的特性を実験的に求めたデータ<sup>46)</sup>はきわめて少ない。アノード支配を前提として、既往のデータ(塩化物イオンの拡散係数、酸素拡散係数、水分量、錆の弾性係数など)を参考として腐食モデルを組み立て腐食開始や膨張ひび割れ発生時間を解析的に求める試みもなされている<sup>47),48)</sup>。また、軸方向ひび割れだけでなく実状は剥離ひび割れも多いことから、このメカニズムを実験および解析で検討した報告もある<sup>49)</sup>。コンクリート表面にひび割れが到達する時点を限界とする考え方が多いが、腐食量は少なく耐荷力に与える影響も極めて小さいことから、補修の時期や順序を定めるためにある程度のひび割れも許容するとする考えもある。

## b) 中性化と寿命推定

1) 劣化と性能低下：炭酸化研究委員会 (JCI) では<sup>50)</sup>“炭酸化”は“セメントの水和生成物が二酸化炭素と反応し、炭酸化合物およびその他の物質に分解する現象”とし、“中性化”は“セメント硬化体のアルカリ性が低下する現象”と厳密に区別している。中性化は炭酸化以外に酸性雨や火災などの他の要因によっても生ずるが、炭酸化によるものが主因とされており、炭酸化による中性化を一般に“中性化”と呼ぶことが多い。

コンクリートの炭酸化ないし中性化の研究では、化学的なメカニズムを追求するものと、物性変化と構造物(部材)におよぼす影響を検討するものに大別される。前者に関しては、炭酸化研究委員会<sup>50)</sup>でそのメカニズムについての詳細な報告がなされている。また、小林は<sup>39)</sup>コンクリート表層からの炭酸化によって内部イオンの物質移動が生じ、塩化物イオンは炭酸化フロントの前面に濃縮されるとし、さらに、炭酸化によって、C—S—H系のゲルが分解する可能性のあることを指摘している。強度に及ぼす影響に関しては多くの報文があるが、たとえば、佐伯ら<sup>51)</sup>は中性化によって組織の緻密が起り強度増加するとしている。

中性化による最も大きな影響は、コンクリート中内部鋼材に対する防錆機能の低下である。中性化とコンクリート中に鉄筋腐食に関して樫野ら<sup>52),53)</sup>は多くの実験を実施し、塩化物の有無について中性化残りと腐食の関係を述べている。中性化の条件と鉄筋腐食の条件は相違しており、前者では湿度60%前後で最も中性化が進行するが、後者では湿分と酸素の供給が交互(通常、高温・高湿、低温・低湿)に作用するとき最も不利な環境であり、中性化が早いことが、腐食が早いことと一致しない。それぞれの測定法も相違しているが、佐伯・大即ら<sup>54)</sup>は電気化学的手法も取り入れて、中性化と腐食の関係を検討している。

2) 中性化の予測：供試体の長期暴露試験、既設コンクリート構造物の調査などを基として、浜田、岸谷、白山らは中性化の速度式を提案しており、文献25)などにこれらの式がまとめられている。中性化は主に炭酸ガスがコンクリート細孔に移動することにより生ずるものであり、水、二酸化炭素や水酸化カルシウムの拡散、気体の液相への溶解速度、炭酸化の反応速度などを考慮したモデルを構成し、解析的に中性化の進行を予測する研究が佐伯ら<sup>55)</sup>や福島<sup>56)</sup>によってなされている。

3) 中性化と劣化予測：和泉<sup>29)</sup>は既設構造物の中性化や鉄筋腐食の調査などから、残存寿命予測、劣化診断などの手法を提案している。中性化や鉄筋のかぶりのパラツキを考慮して、ある時点での腐食確率を求め、鉄筋腐食に至る年数を予測するものであり現実的な方法である。

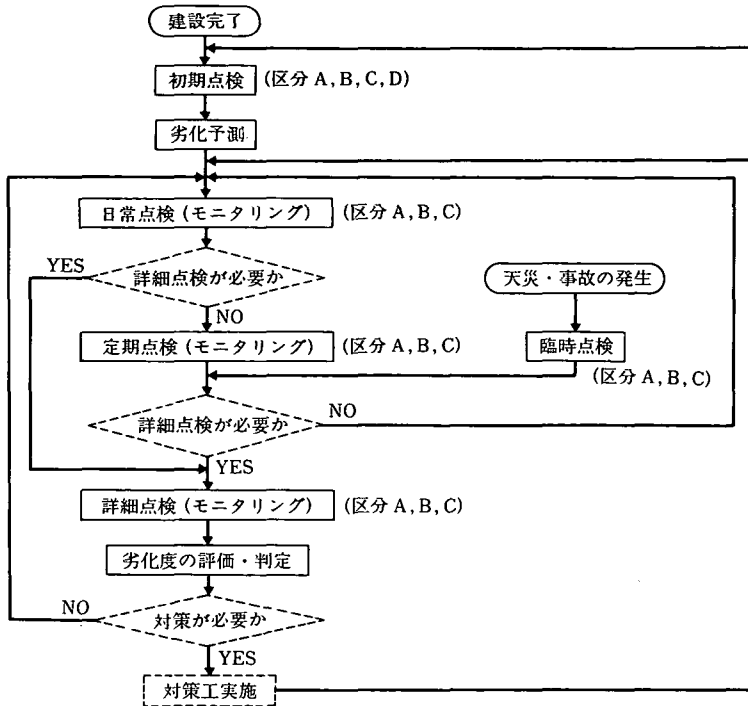
## c) その他の劣化要因と予測

塩害や中性化に関してはそれらのメカニズムや寿命予測に関して種々の検討がなされているが、他の劣化要因に関しては基本的劣化を生じないように材料、配合、施工の段階で慎重な配慮を行うことを前提としている。劣化が顕在化した段階でなんらかの対策を施していることが多いが、劣化予測の試みもなされている。

1) アルカリ骨材反応：アルカリシリカ反応(以下本文ではASRと記す)による膨張によりコンクリートにひび割れが生じ、内部鋼材の腐食、変形の増大、美観の低下などを引き起こす。現状で定量的な劣化進行の予測は不可能であるが、劣化進行の可能性の判断は定性的にはある程度可能と考えられる<sup>5)</sup>。骨材やモルタルバーなどを用いて膨張の可能性を判断することもできるが、既設構造物から採取した試料による残存膨張量は今後のコンクリートの膨張を判断する大きな目安となる。維持管理指針(案)<sup>2)</sup>では、有害な膨張を引き起こし構造物の性能低下をもたらす可能性がある残存膨張量として0.1%以上の数値を提示している。

2) 凍害：コンクリート中の水分の凍結膨張の繰返しにより、コンクリートのひび割れ、表層モルタル層のスケール、表層部分の骨材のポップアウトなどを引き起こし、美観の低下、内部鋼材の腐食などを惹起する。劣化の進行を定量的に予測することは現状で不可能であるが、使用骨材の物理試験(たとえば、吸水率3%以下、安定性損失重量12%以下)やコンクリートの凍結融解試験(相対動弾性係数80%以上)で耐凍害性を判断することができると言われ、凍害深さ率(凍害深さ/かぶり)から劣化予測を試みることも考えられる<sup>2)</sup>。

3) 疲労：疲労荷重・外力を受ける構造物には、鉄道施設の橋梁(繰返し荷重の大きさ、作用位置および回数は明確)、道路橋(荷重はある範囲内で分布し、作用位置は不明確)、防波堤(波力の大きさは広い範囲に分布し、回数は極めて多い)などがある。鉄道施設は設計時にマイナー則の直線被害則を適用することにより疲労に対処しており、港湾施設では通常は設計上疲労で決まることはない。道路橋のコンクリート床版は自動車荷重により一方向ひび割れから格子状ひび割れに進展し、ひび割れが床版を貫通すると二方向部材としての床版の耐荷機能は失われ、曲げやせん断に対する抵抗力は著しく低下し、変形は増大する。劣化度の予測として、ひび割れ密度、ひび割れの開閉量や段差量、たわみなどの指標を用いることが考えられている<sup>2)</sup>。また、石井ら<sup>57)</sup>は建設時図書、現在の損傷状態、輪荷重疲労載荷試験の結果などS—N曲線を修正して残存寿命を推定する手法を提案している。



図一三 維持管理区分における点検の位置づけ<sup>2)</sup>

## 5. 点検方法の現状および判定技術

### (1) 点検の分類および方法

#### a) 点検の分類

点検の分類として、実施機関の基準類では(一次診断、二次診断…), (日常点検, 定期点検, 臨時点検), (巡回点検, 定期点検, 動態点検, 臨時点検, 追跡点検), (標準調査, 詳細調査), (全般調査, 個別調査)などの区分けがなされている<sup>9),11)</sup>。これらの点検は, (初期点検, 日常点検, 定期点検, 詳細点検, 臨時点検)にまとめられるであろう<sup>2)</sup>。図一三は維持管理のプロセスにおける各種点検の一般的な位置づけを示している<sup>2)</sup>。どの点検をどの程度の頻度で実施するかは, 維持管理の区分, 構造物の重要度, 検査に要する費用などを考慮して定められる。予防維持管理とする場合には, さらにモニタリングも併用することが推奨されている。日常点検は目視による点検であり, 定期点検は目視を主体とし場合によっては局所的な破壊による測定も含んでいる。詳細点検はおもに局所的な破壊やコア採取も含んだ調査であり, 臨時点検は異常時(地震, 台風など)において実施されるものである。定期点検の頻度として, 供用初期には3~4年間隔, 供用10年で2年間隔を推奨する報告もあり<sup>7)</sup>, 点検コストと補修費用をミニマムコストとするように頻度を定めようとする考えもある<sup>15)</sup>。

点検の項目は, 表一に示すように<sup>9)</sup>多岐に亘っているが, 劣化の機構によって選択すべき項目は当然相違する。それぞれの点検段階の項目の一例を図一四に示す<sup>2)</sup>。

### (2) 点検技術

非破壊検査としては

#### ①一般的な劣化の状況の把握

目視, 写真撮影など

#### ②強度などの物理的性質の推定

反発硬度法, 超音波法, たわみ測定法  
振動計測法など

#### ③内部欠陥の推定

打音法, 超音波法, 衝撃弾性波法  
赤外線法, マイクロ波法, 放射線法  
AE法など

#### ④形状などの推定

衝撃弾性波法, マイクロ波法, 電磁誘導法  
放射線法など

などがあり, 局所的な破壊を伴うものとしては,

#### ①腐食の測定

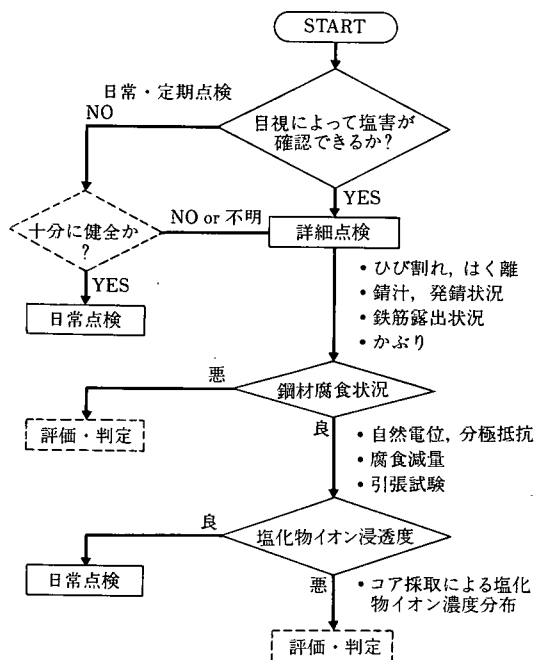
自然電位法, 分極抵抗法など

#### ②強度などの物理的性質の推定

引抜き法, 貫入抵抗法, 応力測定法など  
コア採取によって

表一 点検項目<sup>58)</sup>

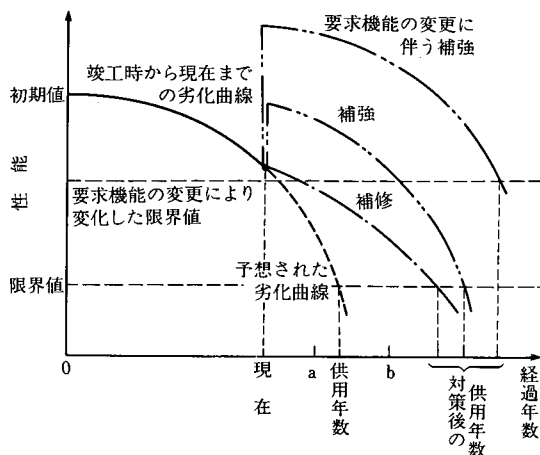
分類	点検項目
劣化外力	荷重強度および荷重繰返し、塩化物供給量、乾湿繰返し(塩害)、温度条件(アル骨、塩害)、凍結融解作用、水分の補給(アル骨)、化学作用
材料面	工事記録などの図書(セメントの種類、骨材産地、比重、コンクリートの配合、鉄筋の種類など)、コンクリートの物性(超音波速度、強度、弾性係数など)、含有塩化物量、鉄筋腐食(欠損率、自然電位、分極抵抗)、中性化深さ、残存膨張量
施工面	かぶり、配筋状態、内部欠陥
構造面	設計基準、断面諸元、ひび割れ状況(ひび割れ深さ、ひび割れ幅など)、剛性(変形量など)、振動特性、支持状態、補修・補強履歴、路面の凹凸度
第三者影響度	遊離石灰、漏水、コンクリートの浮き、コンクリート片・タイル等の落下、表面の変色(表面のかび錆汁など)



図一 塩害に関する点検の内容<sup>2)</sup>

強度など物理的性質の測定、配合分析  
 中性化の測定、塩化物イオンの分析  
 アルカリ骨材反応の推定など  
 など多様な方法があり、それぞれの劣化機構における選択基準は文献<sup>2)</sup>の付録に掲載されている。また、点検の概要や測定技術に関しては多くの報文や書籍がある<sup>2), 59)~63)</sup>など。

現在、確度の高い精度を有する測定方法は限定されており、今後は、より信頼性の高い測定技術の向上、物理系・化学系の他分野の測定技術の積極的な導入が求められる。



図一 経年による性能の変化と補修・補強の概念図<sup>64)</sup>

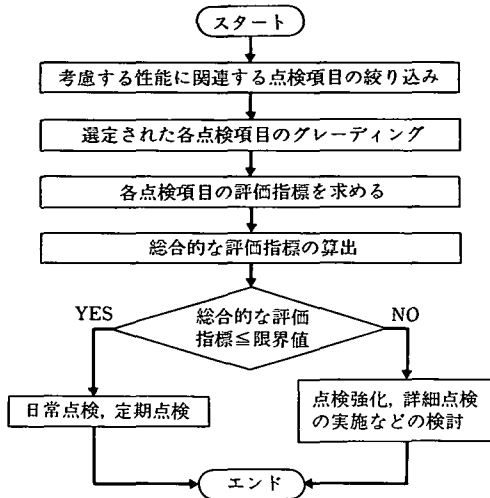
れる。また、測定が短時間で簡易に完了し、操作も容易であり、面的な測定も可能な検査方法の開発も必要と思われる。さらに、測定結果を基に劣化度(性能低下の割合)や原因推定に利用できる評価・判定技術も必要である。

(3) 対策の要否の判定方法

a) 評価・判定の考え方

構造物の機能は経年と共に徐々に低下すると予想される。図一は耐荷性に関して経過年数による変化の予想図を示したものである<sup>64)</sup>。判定結果によっては種々の対策をとることとなる。詳細点検を含めると主な点検項目は、たとえば、耐荷性では

- 劣化外力(荷重・外力、それらの繰返し)
- 材料面(工事記録、コンクリートの物性、鉄筋腐食)
- 施工面(配筋状態、内部欠陥)
- 構造面(設計基準、断面諸元、ひび割れ状況、剛性、



図一六 グレーディングに基づく評価判定のフロー<sup>2)</sup>

支持状態)

また、耐久性（塩害）では

劣化外力（塩化物イオン供給量，乾湿繰返し，温度条件）

材料面（工事記録，コンクリートの物性，含有塩化物イオン量，鉄筋腐食）

施工面（かぶり，内部欠陥）

構造面（断面諸元，ひび割れ状況，補修および補強の履歴）

第三者影響度（漏水，コンクリートの浮き，表面の変色）

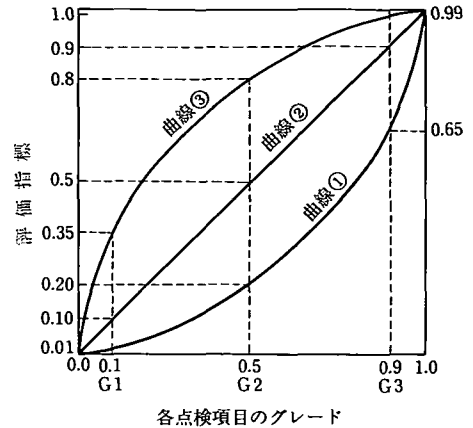
などが挙げられている。これらの項目を総合的に定量的に評価することは困難で、実務的には項目を絞り定性的な判断を行っているのが実状である。

#### b) 評価および判定方法

1) 一般的な判定方法：定量的な評価を試みた方法として、図一六に示すフローによるグレーディング（重み付け）を用いた評価判定法が提案されている<sup>2)</sup>。これは、たとえば、図一七の感度曲線に示すように個々の点検項目におけるグレード（劣化度）に重み付けの評価指標を与え、これらの和と評価指標の限界値を比較しこれを上回るか否かで詳細調査の必要性を判断するものである。

また、鉄道構造物では次のような判定・評価を行っている<sup>3)</sup>。目視による検査から構造物の変状に対して判定区分を設定し、健全度に応じて対策を提示している。すなわち、

- AA：ただちに取替え，所要停止の措置
- A1：早急に措置
- A2：必要な時期に措置
- B：日常監視を強化し必要に応じて措置



図一七 点検項目におけるグレード（劣化度）と評価指標<sup>2)</sup>

C：重点的に検査

S：健全

また、ひび割れの幅や長さの大きさに応じた区分、剝離・剝落の面積や個数に応じた区分を設定し、区分を総合的に考えて耐荷性の低下の可能性や第三者障害の可能性をランク分けする考え方もある<sup>6)</sup>。この場合、耐久性に関してはさらに建設後の年数なども考慮に入れて判断することとしている。

2) 塩害に対する判定方法：維持管理指針（案）の付属資料IX<sup>2)</sup>では鉄筋の腐食やひび割れを指標として、劣化状態をI（潜伏期）からIV（劣化期）にランク分けし、それぞれの性能（耐荷性，周辺環境への影響性，耐久性）に応じた限界の状態を考えている。

橋床版を対象として、スラブ，はり，ハンチの鉄筋の腐食度，かぶりコンクリートの劣化（ひび割れ，剝離・剝落）を目視の調査で把握し，部材単位で劣化度を類別し，構造物1ブロックを単位として総合的に評価する方法も活用されている<sup>7)</sup>。この方法では、

- 劣化度0およびI：補修の要なし
- 劣化度II：補修の要なし（場合により補修）
- 劣化度IIIおよびIV：要補修
- 劣化度V：要補修（場合により補強）

また、鉄筋の露出，ひび割れ，錆汁，はくりなどの目視検査から，損傷度をI～IVおよび無に分類し，補修の要否を判定する提案もある<sup>8)</sup>。

3) 中性化に対する判定方法：通常はフェノールフタレイン1%アルコール溶液をコンクリートに噴霧し，非発色領域の深さを中性化深さとし鉄筋のかぶり比較して鉄筋腐食の可能性を判断している。鉄筋腐食を直接判定するために電気化学的方法も考えられるが，応用された例は少ない。判定方法全般に関しては，炭酸化研究委員会（JCI）の報告<sup>63)</sup>がある。



表-2 劣化機構と補修計画<sup>2)</sup>

劣化機構	補修方針	補修工の構成
塩害	・侵入したCl <sup>-</sup> の除去 ・補修後のCl <sup>-</sup> 、水分、酸素の侵入抑制	断面修復工*1 表面保護工
	・鉄筋を不活性電位に移動 ・浸透塩化物の除去	電気防食工法 強制電気脱塩工法
中性化	・中性化したコンクリートの除去 ・補修後のCO <sub>2</sub> 、水分の侵入抑制 ・コンクリートを再アルカリ化	断面修復工 表面保護工 再アルカリ化工法
凍害	・劣化したコンクリートの除去 ・補修後の水分浸入抑制 ・コンクリートの凍結融解抵抗性の向上	断面修復工 ひび割れ注工 表面保護工
アルカリ骨材反応	・水分の供給抑制 ・内部水分の散逸促進 ・アルカリ供給抑制	ひび割れ注工 表面保護工
化学的コンクリート腐食	・劣化したコンクリートの除去 ・有害化学物質の侵入抑制	断面修復工 表面保護工
疲労 (道路橋鉄筋コンクリート床版の場合)	・軽微な場合にはひび割れ進展の抑制(大半は補強に該当する)	

\*1 劣化したコンクリート部分を取り去り、断面を修復することを示す。

4) アルカリ骨材反応に対する判定方法：損傷の程度と補修・補修の時期、構造物の美観、構造物の種類と重要度、採取したコアの膨張(特に、残存膨張)などを考慮して総合的に判定する<sup>9)</sup>。これと同様に、ASRにより被害を受けた構造物は、その目的や機能およびASRが進行性か否かを判断し補修の必要性を定めるとするものもある<sup>6)</sup>。実務では、採取コアの膨張、ゲルの有無、ひび割れの大きさや長さなどから、補修の要否を判断している<sup>66)</sup>。いずれにせよ、アルカリ骨材反応に対する判定は塩害や中性化に対するよりも困難を伴うと考えられる。

5) その他の判定方法：道路橋の鉄筋コンクリート床版では主に目視により遊離石灰の溶出やひび割れの発生状況、剝離状況などからパネル別の損傷度を判定し、床版パネルの損傷面積からスパン別(支間×幅員)の損傷度(I~V)を定め、補修の緊急度や必要性の基準としている<sup>10)</sup>。保護工に対しては、表面のふくれやはく離の状況から判定区分(A~C)を定め、区分Aでは補修が必要としている<sup>11)</sup>。

ひび割れ幅と補修の要否に関しては、ひびわれ指針(JCI)<sup>9)</sup>の表-2に示されている耐久性と防水性の観点からの許容ひび割れ幅の値が実務では活用されている。松島ら<sup>67)</sup>は専門家の知識と経験を基に補修ひび割れ幅の分析を行い、統計的手法によりひび割れ幅の許容値を示している。ほぼ同様の手法で金子ら<sup>68)</sup>は美観や不安感の観点からひび割れ幅の許容値に関して技術者へのアン

ケート調査を基として、次の概略値を示している。

美観に対しては：0.4 mm (RCおよびPC)

ひび割れによる構造的不安感に対しては：

部材軸と直角 0.5 mm (RC)

0.4 mm (PC)

部材軸と角度を有する場合

0.25 mm (RC)

0.15 mm (PC)

部材軸と平行方向

0.1 mm (RCおよびPC)

## 6. 補修および補強工法の現況

本文では、補修および補強を次のように考えることとする<sup>2)</sup>。

補修：耐久性の回復・向上と第三者影響度の低減を目的とした対策

補強：耐荷力を当初の水準まで回復あるいはそれ以上の水準まで向上させる対策

### (1) 補修工法

#### a) 劣化機構と補修工法

1) 工法の種類：補修工法としては、ひび割れ注工、表面保護工、断面修復工、強制電気工法(電気防食工法、脱塩工法、再アルカリ化工法、電着工法)に大別される。

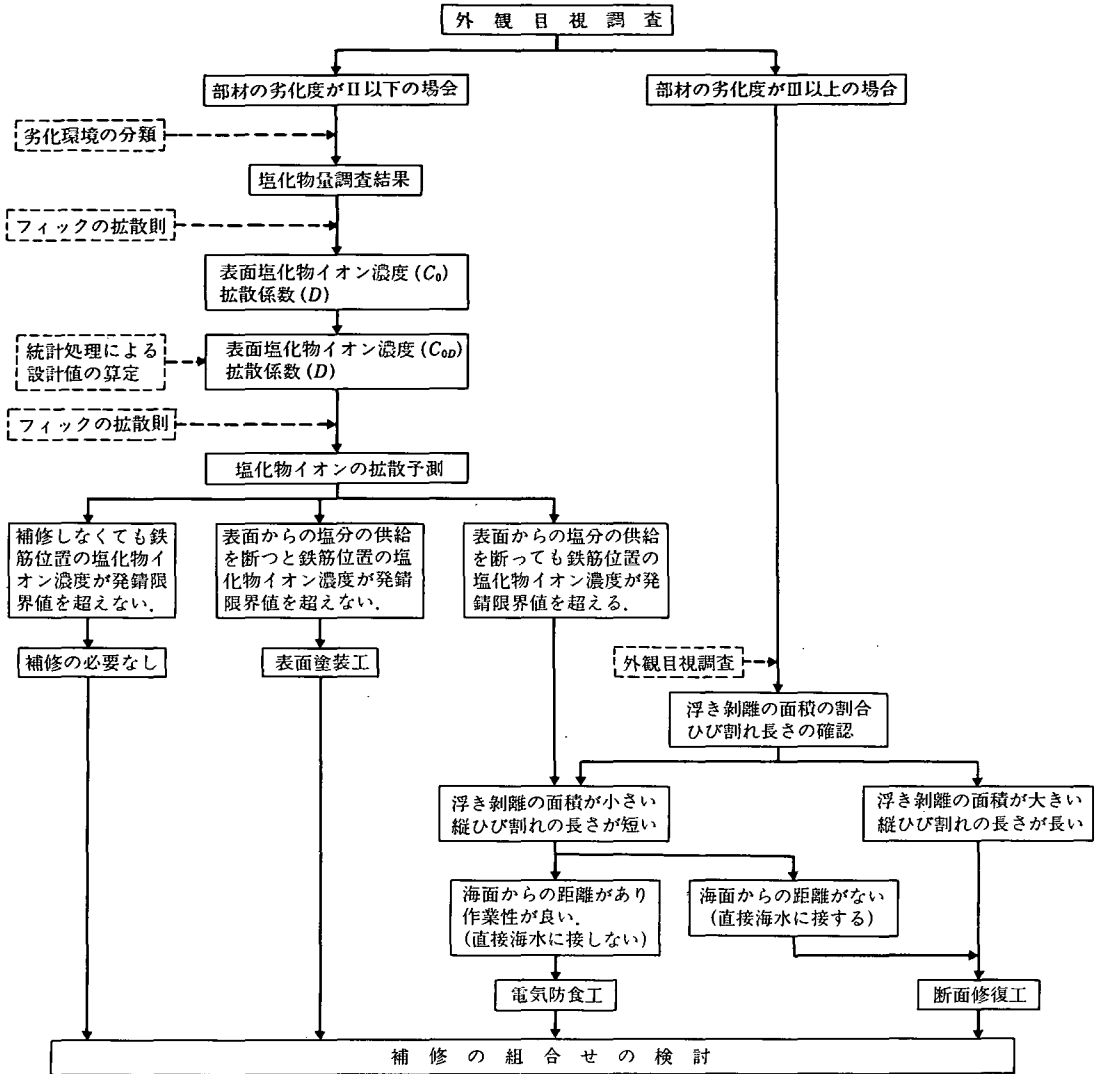


図-8 さん橋における補修工法選定例<sup>9)</sup>

表-2は劣化機構に対応した補修工法をまとめたものである<sup>2)</sup>。

2) 工法の選定方法：表面保護工はコンクリート表面に膜を形成し劣化要因（塩害では酸素，水分や塩化物イオン，アルカリ骨材反応では水分）を遮断する方式である。断面修復工では，劣化したあるいは劣化因子に侵食されたコンクリートを除去する方式であり，強制電気工法は腐食抑制，塩化物除去，pHの回復，ひび割れ充填などの目的で適用される。これらの工法の選定には，劣化の程度，構造物の重要度，今後の供用年数，施工の難易，経済性などを考慮している。塩害における最近の研究<sup>9)</sup>に基づいた選定のフローの例を図-8<sup>9)</sup>に示す。

#### b) 各種補修工法

補修工法に関しては，現在までに多くの報文や技術書が出されている。

基準類において補修計画(補修工法の選定，補修設計，施工計画など)，補修の施工や管理などを扱ったものでは，コンクリート構造物全般に対しては文献2)，アルカリ骨材反応に対しては文献5)，公共施設での塩害やアルカリ骨材反応に対しては文献6)，港湾施設では塩害に対して文献7)，鉄道施設では文献9)，鋼橋鉄筋コンクリート床版や高欄・地覆に対しては文献10)，コンクリート構造物表面保護工や橋脚に対して文献11)，コンクリート塗装やFRP補修に対して文献12) などがある。

補修全般についての解説ないし技術書としては，文献

2)の付属資料,文献70)―74)などがある。また,補修事例をまとめたものには,文献75)などがある。

### c) 強制電気工法

内部鋼材とコンクリート表面の間に電流を印加する複修工法は,原理的に極めて効果の高い方法と考えられ,最近室内実験や現場実験で多くの技術的検討がなされ,一部実用に供されている。

1) 電気防食工法:内部鋼材をカソード(電位が卑),コンクリート部材表面をアノード(電位が貴)として電位差を与え内部鋼材を不活性の防食状態とするカソード防食が一般的で,外部電源方式と流電陽極方式の2種がある。供用期間中は10~20 mA/m<sup>2</sup>(コンクリート表面積当たり)程度の微弱電流を流し続けることになる。現状の技術レベルや課題に対しては,電気防食法研究委員会(JCI)によって詳細な文献調査や実験研究がなされ,報告書<sup>76),77)</sup>としてまとめられている。試験工事だけでなく,最近はこの工事にも適用されている。補修面積が広がると電位や電流の管理が煩雑となるが,電話回線を用いた集中管理システムも検討されている。

また,石井ら<sup>78)</sup>はPC部材への適用も検討している。適用における主な課題は,過防食によるPC鋼材の水素脆化であり,水溶液中でのPC鋼材の水素脆化感受性試験,コンクリート供試体やPCはり部材での実験から通常の通電では水素脆化の危惧はないことを報告している。

2) 強制電気脱塩工法:コンクリート内部に蓄積された塩化物イオンを電気泳動により電気的に外部に排除する工法であり,通常デサリネーション工法といわれている。原理は電気防食工法の外部電源方式と同様であるが,印加される電流は電気防食工法におけるよりも2桁ほど大きく,1.0~5.0 A/m<sup>2</sup>(コンクリート表面積当たり)程度といわれている。電気防食工法では常時通電の状態が必要であるが,本工法における上記の印加電流では,通電時間は4~8週程度で目的が達せられるようである。高電流を印加することによる課題も指摘され,鉄筋とコンクリート界面におけるアルカリイオンによるコンクリートの軟化と付着強度の低下<sup>79)</sup>,カソード側におけるアルカリイオンの集積とアルカリ骨材反応の可能性<sup>80)</sup>なども検討されている。また,塩化物イオンのアノード側への移動効果を示す報告もあり<sup>81)~83)</sup>,鉄筋の腐食抑制に副次的にも効果があることを示している。本工法は短時間で腐食物質の除去が可能であり,長年月の保守を必要としない利点を有しており,今後適用の可能性も大きいと思われる。

3) 再アルカリ化工法:中性化したコンクリートのpHを高め再びアルカリ性に戻すことを目的としたもので,基本的原理は強制電気脱塩工法と同様である。コンクリート部材表面のアノード部の電解液には,通常炭酸ナトリウムや炭酸リチウムを用い,電気泳動によるカ

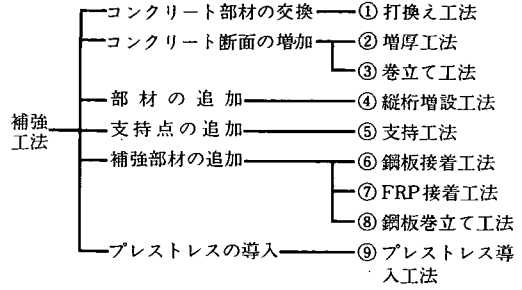


図-9 補強工法の例<sup>2)</sup>

ソード側へのアルカリの移動およびOH<sup>-</sup>の生成を図るものであり,通電は数日で完了するようである。課題は強制電気脱塩工法と同様であるが,前工法と同様に従来工法にない利点を有しており,今後多くの場で活用される機会も多くなると思われる。

4) 電着工法:海岸域(海面下)にある構造物に応用される工法であり,海水中にあるCa<sup>2+</sup>イオンやMg<sup>2+</sup>イオンを電解によりカソード側にCaCO<sub>3</sub>やMg(OH)<sub>2</sub>を主成分とする電着物として析出させる。鉄筋コンクリート構造物では,鉄筋をカソードとし,海水中にアノードを設置し通電する。護岸ケーソンに適用した例では,0.5 A/m<sup>2</sup>(コンクリート表面積当たり)程度の電流を5カ月程度印加することにより,コンクリートひび割れへの電着物の充填などの効果が認められている<sup>84)</sup>。

### d) 補修工法の課題

構造物の補修の必要性が認識されてから未だ時期が浅く,補修工法はその時点での最良と考えられるものを選択して実施されてきていると考えられる。多くのハード技術が開発され試用されているのが実状と思われ,多くの解決すべき課題もある。たとえば,

- ①補修材料の耐久性(経年による変質)が不明確で,補修工の効果が認識されにくい。
- ②既設の構造物はメンテナンスを念頭において設計されておらず,補修工事は足場その他を含めて作業環境は良好でない。補修工法の工種の単純化や簡素化が望まれる。
- ③作業環境や作業員の確保を考慮すると,補修作業にロボット化を導入する試みが必要と思われる。

上記の①に関しては,補修工法研究委員会(JCI)<sup>85)</sup>の基で暴露実験が進行中である。また,試験工事も多く実施されており,これらの成果も補修の評価に有効な資料となるものと思われる。

## (2) 補強工法

### a) 補強工法の種類

維持管理指針(案)<sup>2)</sup>では,補強工法例として図-9をあげている。劣化の原因,構造物の重要性,荷重条件,

部材の種類, 施工性などを勘案して定めることになる。

#### b) 各種補強工法

基準類として補強計画(補強工法の選定, 施工計画など), 補強の施工, 施工管理などをまとめたものに文献2), 文献11) および文献12) がある。文献11) では鋼板接着工法を, 文献12) では, 鋼板接着工法, FRP 接着工法, 増厚工法, プレストレス導入工法, 打換え工法, 支持工法を記載している。

補強を扱った技術書ないし解説書には, 文献70), 71) などがある。また, 文献2) の付属資料には補強事例がまとめられている。

補修に比較すると補強の報文は圧倒的に少ない。これは, 劣化の対策として耐荷性が問題となることが少ないこと, 補強の判定が困難なことなどが考えられる。しかし, 今後は耐荷性からの評価が求められる事例も増加すると思われ, さらなる調査・研究や技術開発が求められる。

## 7. あとがき

本文は維持管理に関して研究や技術の現状を取りまとめた。“コンクリート構造物を維持管理する”という考え方は比較的新しく, 現場で技術者が問題に当面し苦労されながら技術開発を進めてきた部分が多い。特に, ハードな面で多くの対策が採られてきており, 補修工法では技術的蓄積も増加している。今後, “維持管理”の技術のさらなる向上を図り体系化を推し進めるためには, 次の事項もさらに検討を行う必要があると思われる。

(1) 構造物の維持管理を考慮した設計を行なう必要がある。たとえば,

- ・劣化が生じにくい構造形式とする。
- ・維持管理が容易な構造形式とする。
- ・設計の段階で劣化の予測を行い, 構造物の供用期間を明確とする。

(2) 劣化予測のさらなる研究が必要である。現在, 塩害や中性化に対しては研究もあるが, 他の劣化機構に対しても多くの取り組みが必要と思われる。

(3) 現在行われている調査・研究の多くは材料レベル・部材レベルである。構造物としての荷重・外力条件の変化(たとえば, 不等沈下)などに由来した構造物の機能低下の対処や対策などに対してもさらに検討が必要と思われる。

(4) 劣化による機能低下に対する総合的な判定・評価手段が不足している。機能の内容や限界値を精査すると共に, 定量化するための作業が必要と考えられる。

(5) 維持管理に対してハードな分野だけでなく, ソフトな面での考え方を応用する必要がある。たとえ

ば,

・維持管理の不確実性に対して知能工学(ファジー, ニューラルネットワークなど)を応用することも大切である。

・トータルコストを考慮したシステムを検討する必要がある。

(6) 補修材料に対しては, 耐久性, 性能評価方法, 試験方法などを明確にする必要がある。

(7) 測定や運搬が容易で, 精度の高い非破壊検査試験装置の技術開発が望まれる。

## 参考文献

- 1) 長瀧重義: コンクリートの長期耐久性, 技報堂出版, 254 pp., 1995.11.
- 2) コンクリート構造物の維持管理指針(案), 土木学会, コンクリートライブラリーNo.81, 137 pp., 1995.10.
- 3) 建築物の調査・劣化診断, 修繕の考え方(案)・同解説, 日本建築学会, 1988.
- 4) コンクリートのひびわれ調査, 補修・補強指針, 日本コンクリート工学協会, 328 pp., 1987.2.
- 5) アルカリ骨材反応調査研究委員会報告書, 日本コンクリート工学協会, 235 pp., 1989.7.
- 6) コンクリートの耐久性向上技術の開発<第一編>および<第二編>, 建設省・国土開発技術センター, 591 pp.および553 pp., 1988.11.
- 7) 港湾コンクリート構造物の劣化防止・補修マニュアル(案), 沿岸開発技術研究センター, 251 pp., 1987.9.
- 8) 佐々木栄三, 川田秀夫, 関博: 大規模橋の維持管理システムと補修計画の策定, コンクリート構造物の補修工法と電気防食に関するシンポジウム論文報告集, pp.177-184, 1994.10.
- 9) 鉄道総合技術研究所: 建築物 保守管理の標準・同解説 コンクリート構造, 研友社, 108 pp., 1987.9.
- 10) 維持修繕要領 橋梁編, 日本道路公団, 1988.5.
- 11) 道路構造物の補修要項 第2部 コンクリート構造物, 阪神高速道路公団, 193 pp., 1990.6.
- 12) 既設道路橋の補修・補強の手引き(案), 首都高速道路公団, 1993.7.
- 13) コンクリート構造物の寿命予測と耐久性設計に関するシンポジウム論文集—委員会報告: コンクリート構造物の寿命予測と耐久性設計に関する技術の現状—, 日本コンクリート工学協会, pp.79-132, 1988.4.
- 14) 宮本文穂: Bridge Management System (MS) の現状と将来, 土木学会, コンクリートライブラリー, No.81, pp.120-125, 1995.10.
- 15) 松島学, 関博, 松井邦人: RC 橋架設の最速検査間隔, 土木学会論文報告集, No.451/V-17, pp.197-204, 1992.8.
- 16) 白石成人, 古田均, 池島賢治: 信頼性解析へのファジイ理論の適用に関する基礎的研究, 土木学会論文報告集, No.325, pp.1-10, 1982.9.
- 17) 白石成人, 古田均, 川村幸男: 事故解析へのファジイ積分の応用, 土木学会論文報告集, No.339, pp.33-40,

- 1983.11.
- 18) 西村昭, 藤井学, 宮本文穂, 富田隆宏: 橋梁診断のシステム化に関する基礎研究, 土木学会論文集, No. 378/V-6, pp.175-184, 1987.2.
  - 19) 西村昭, 藤井学, 宮本文穂, 小笠勝: 構造物の健全度診断へのファジー集合論の適用に関する基礎的研究, 土木学会論文集, No. 380/I-7, pp.365-374, 1987.4.
  - 20) 松島学, 関博, 松井邦人, 梅原健生: ファジイ理論に基づいた海岸施設の劣化診断, 土木学会論文集, No. 433/V-15, pp.111-118, 1991.8.
  - 21) 宮本文穂, 森川英典, 山本昌孝: 既存コンクリート橋の損傷に対応する動的挙動の感度特性と損傷評価への適用, 土木学会論文集, No. 442/V-16, pp.61-70, 1992.2.
  - 22) 宮本文穂, 森川英典, 石田宗弘: 統計データに基づく不確定性を考慮した既存コンクリート橋の安全性評価, 土木学会論文集, No. 472/V-20, pp.49-58, 1993.8.
  - 23) 古田均, 渡邊英一, 賀建紅: 遺伝的アルゴリズムとニューラルネットワークを用いた RC 床版の耐用性評価における意識獲得支援手法, 土木学会論文集, No. 537/I-35, pp.145-153, 1996.4.
  - 24) 桜井宏, 鮎田耕一, 佐伯昇, 鈴木明人: 信頼性理論によるコンクリート構造物の劣化の評価, コンクリート工学年次論文報告集, pp.629-632, 1991.6.
  - 25) 和泉意登志, 喜多達夫, 前田照信: 中性化, 技報堂出版, 112 pp., 1986.8.
  - 26) 関博, 金子雄一: コンクリート部材の寿命予測-鉄筋の腐食を中心として-, コンクリート工学, Vol. 29, No. 8, pp.15-23, 1991.8.
  - 27) 森川英典, 宮本文穂, 竹内和美: 統計解析に基づく既存コンクリート橋の安全性および寿命評価, 土木学会論文集, No. 502/V-25, pp.53-62, 1994.11.
  - 28) 加藤裕久, 小松幸夫: 木造専用住宅の寿命に関する研究-累積ハザード法による寿命推定-, 日本建築学会計画系論文報告集, No. 363, pp.20-26, 1986.
  - 29) Bazánt, Z.P.: Physical Model for Steel Corrosion in Concrete Sea Structures-Theory, *Jour. of Structural Division, ASCE*, Vol. 105, No. ST6, pp.1137-1153, 1979.
  - 30) Bazánt, Z.P.: Physical Model for Steel Corrosion in Concrete Sea Structures-Application, *Journal of Structural Division, ASCE*, Vol. 105, No. ST6, pp.1155-1166, 1979.6.
  - 31) Browne, R.D.: Design Prediction of the Life for Reinforced Concrete in Marine and Other Chloride Environments, *Durability of Building Materials*, Vol. 1, pp.113-125, 1982.
  - 32) 大即信明, 森好生, 関博: 海洋環境におけるコンクリート中の塩素に関する一考察, 土木学会論文報告集, No. 332, pp.107-118, 1983.4.
  - 33) Takewaka, K. et al.: Quality and Cover Thickness of Concrete Based on the Estimation of Chloride Penetration in Marine Environments, *ACI SP109*, pp. 381-400, 1988.
  - 34) 丸屋剛, Somnuk, T., 松岡康訓: コンクリート中の塩化物イオンの移動に関する解析的研究, 土木学会論文集, No. 442/V-16, pp.81-90, 1992.2.
  - 35) 大城武, 堀園義昭, 谷川伸, 永井健太郎: コンクリート中への塩化物イオンの浸透に関する実験的及び解析的研究, コンクリート工学年次論文報告集, Vol. 9, No. 1, pp.369-374, 1987.
  - 36) 小林一: コンクリートの炭酸化に関する研究, 土木学会論文集, No. 433/V-15, pp.1-14, 1991.8.
  - 37) 前川宏一, 小澤一雅, 國島正彦: 複数の劣化因子から構成されるシステムの経時変化予測, コンクリート構造物の寿命予測と耐久性設計に関するシンポジウム論文集, pp.39-46, 1988.
  - 38) 後藤誠史, 茂啓二郎, 高木達雄, 大門正機: セメント硬化体の細孔径分布とイオンの拡散, セメント技術年報, Vol. 36, pp.49-52, 1982.
  - 39) 大即信明, 横井聡, 下沢治: モルタル中鉄筋の不動態に及ぼす塩素の影響, 土木学会論文集, No. 360/V-3, pp. 111-118, 1985.2.
  - 40) 宮川豊章: Early Chloride Corrosion of Reinforcing Steel in Concrete, 京都大学学位論文, 1985.2.
  - 41) 関博, 山本英夫: コンクリート中鉄筋における腐食速度の解析に関する一考察, コンクリート工学年次論文報告集, Vol. 9, No. 1, pp.381-386, 1987.
  - 42) 小林一, 出頭圭三: 各種セメント系材料の酸素の拡散性状に関する研究, コンクリート工学, Vol. 24, No. 2, pp. 91-106, 1986.12.
  - 43) 宮川豊章, 松村卓郎, 小林和夫, 藤井学: 鋼材腐食からみたコンクリート中での酸素透過性の検討, 土木学会論文集, No. 408/V-11, pp.111-120, 1989.
  - 44) 森川雅行, 関博, 奥村隆: 鉄筋の腐食膨張によるひびわれの発生機構に関する基礎的研究, 土木学会論文集, No. 378号/V-6, pp.97-105, 1987.
  - 45) 須田久美子, Misra, M., 本橋賢一: 膨張ひびわれ発生限界腐食量に関する解析的検討, コンクリート工学年次論文報告集, Vol. 14, No. 1, pp.751-756, 1992.
  - 46) 吉岡保彦, 米澤敏男: 鉄筋の腐食生成物の力学的特性に関する基礎的な検討, 第 37 回土木学会年次学術講演会, V, pp.271-272, 1982.
  - 47) 関博, 松井邦人, 松島学, 金子雄一, 田畑裕, コンクリート構造物の寿命予測に関する一考察, コンクリート工学年次論文報告集, Vol. 12, No. 1, pp.569-574, 1990.
  - 48) 横関康裕, Misra, M., 本橋賢一: 腐食ひび割れ発生期間に関する解析的検討, 第 49 回土木学会年次学術講演会, V, pp.552-553, 1994.
  - 49) 堤知明, 松島学, 村上裕治, 関博: 腐食ひび割れの発生機構に関する研究, 土木学会論文集, No. 532/V-30, pp. 159-166, 1996.2.
  - 50) コンクリートの炭酸化に関する研究の現状, 日本コンクリート工学協会, 93 pp., 1993.3.
  - 51) 佐伯竜彦, 米山一, 長瀬重義: 中性化によるモルタルの強度変化, 土木学会論文集, No. 451/V-17, pp.69-78, 1992.8.
  - 52) 岸谷孝一, 櫻野紀元: コンクリート中の鉄筋の腐食に関する研究-その 1 コンクリートの中性化が鉄筋腐食に及ぼす影響について-, 日本建築学会論文報告集, No. 283, pp.11-16, 1979.9.
  - 53) 岸谷孝一, 小林一, 櫻野紀元, 宇野祐一: 塩化物を含む

- コンクリート中における鉄筋腐食と中性化との関係, コンクリート工学論文集, Vol. 2, No. 1, pp.77-84, 1991.1.
- 54) 佐伯竜彦, 大即信明, 長瀬重義: 中性化によるモルタル中の鉄筋腐食の定量的評価, 土木学会論文集, No. 532/V-30, pp.55-66, 1996.2.
- 55) 佐伯竜彦, 大即信明, 長瀬重義: コンクリートの中性化の機構解明と進行予測, 土木学会論文集, No. 414/V-12, pp.99-108, 1990.2.
- 56) 福島敏夫: コンクリートの中性化進行の理論的予測法と数値解析-鉄筋コンクリート造建築物外壁の耐久性予測法に関する研究(その1), 日本建築学会構造系論文報告集, No. 428, pp.1-15, 1991.10.
- 57) 石井孝男, 谷倉泉, 庄中憲, 國原博司, 松井繁: 23年供用したRC床版の損傷状態・残存疲労寿命と維持管理との関係に関する基礎的研究, 土木学会論文集, No. 537/I-35, pp.155-166, 1996.4.
- 58) 金子雄一, 宮本文穂, 副手勤, 古谷時春: コンクリート構造物の維持管理における評価判定法の一提案: コンクリート工学年次論文報告集, Vol. 16, No. 1, pp.959-964, 1994.
- 59) 魚本健人, 加藤潔, 広野進: コンクリート構造物の非破壊検査, 森北出版, 230 pp., 1990.5.
- 60) 日本非破壊検査協会編: コンクリート構造物の非破壊検査法, 養賢堂, 377 pp., 1994.12.
- 61) 笠井芳夫編著, 田村博, 富士岳, 笠井哲郎: コンクリート構造物の非破壊検査法, オーム社, 202 pp., 1996.4.
- 62) 建設省土木研究所, 日本構造物診断技術協会: コンクリート構造物の健全度診断技術の開発に関する共同研究報告書, No. 106, 168 pp., 1994.7.
- 63) 劣化を受けたコンクリート構造物の判定マニュアル, 日本コンクリート工学協会, 42 pp., 1993.3.
- 64) 金子雄一, 宮本文穂, 副手勤, 古谷時春, 関博: コンクリート構造物の維持管理における評価・判定の考え方: 土木学会年第48回次学術講演会, V, pp.214-215, 1993.9.
- 65) 小林豊治, 米澤敏男, 出頭圭三: 鉄筋腐食の診断, 森北出版, 1993.
- 66) 杉江功, 杉山功, 山口良弘: アルカリ骨材反応と補修, コンクリート工学, Vol. 31, No. 7, pp.69-73, 1993.7.
- 67) 松島学, 関博, 金子雄一, 松井邦人: コンクリート構造物の補修ひびわれ幅の評価, 土木学会論文集, No. 420/V-13, pp.201-209, 1990.8.
- 68) 金子雄一, 関博, 松島学, 松井邦人: 連続繊維補強材を用いたコンクリート部材の許容ひびわれ幅, 土木学会連続繊維補強材のコンクリート構造物への適用に関するシンポジウム, pp.293-296, 1992.4.
- 69) 守分敦郎, 長瀬重義, 大即信明, 関博, 福手勤: 塩害を受けた栈橋に対する表面処理工法の設計法に関する検討, 土木学会論文集, No. 534/VI-30, pp.109-123, 1996.3.
- 70) 大浜嘉彦監修: 鉄筋コンクリート構造物の劣化対策技術, テクノシステム, 621 pp., 1996.1.
- 71) 特集\*補修・補強, コンクリート工学, Vol. 31, No. 7, 1993.7.
- 72) 関博: 補修・補強技術の発展, コンクリート工学, Vol. 30, No. 9, pp.72-79, 1992.9.
- 73) Emmons, P.H. (原田宏監訳): イラストで見るコンクリート構造物の維持と補修, 鹿島出版会, 228 pp., 1995.9.
- 74) 岡田清/今井宏典監修: 損傷と補修事例に見る道路橋のメンテナンス, 阪神高速道路管理技術センター, 317 pp., 1993.3.
- 75) コンクリート構造物の補修工法委員会: コンクリート構造物の補修事例集, 日本コンクリート工学協会, 230 pp., 1994.10.
- 76) コンクリート構造物の電気防食法研究委員会報告書, 日本コンクリート工学協会, 256 pp., 1994.10.
- 77) コンクリート構造物の電気防食法研究委員会実験報告書, 日本コンクリート工学協会, 165 pp., 1995.6.
- 78) 石井浩司, 関博, 副手勤, 井川一弘, 杉橋直行: PC鋼材の水素脆性に関する実験的研究, 土木学会論文集, No. 532/V-30, pp.131-140, 1996.2.
- 79) 上田隆雄, 宮川豊章, 藤井学, 芦田公伸: デザリネーションが鉄筋の付着挙動に与える影響, コンクリート工学年次論文報告集, Vol. 16, No. 1, pp.1007-1012, 1994.
- 80) 西林新蔵, 林昭富, 王鉄成, 鎌田隆志: アルカリ骨材反応に及ぼす電流場の影響に関する基礎的研究, コンクリート工学年次論文報告集, Vol. 14, No. 1, pp.201-206, 1992.
- 81) 芦田公伸, 石橋孝一: 直流電流によるコンクリート中の塩分の移動, コンクリート構造物の補修工法に関するシンポジウム論文報告集, pp.155-170, 1992.10.
- 82) 久田真, 長瀬重義, 大即信明: 通電によるモルタル中の塩化物イオンの移動程度と脱塩効果, 土木学会第48回年次学術講演会, V, pp.268-269, 1993.9.
- 83) 宇田川秀行, 芦田公伸, 石橋孝一, 半田実: 直流電流による鉄筋近傍へのNaイオンの集中とその後の再分散, コンクリート工学年次論文報告集, Vol. 15, No. 1, pp.829-834, 1993.
- 84) 横田優, 佐々木晴敏, 副手勤: 電着工法による港湾コンクリート構造物の補修と防食について, コンクリート工学年次論文報告集, Vol. 14, No. 1, pp.849-854, 1992.
- 85) コンクリート構造物の補修工法研究委員会報告書(II), 日本コンクリート工学協会, 230 pp., 1994.10.

(1996.9.4 受付)