

## 委員会報告 「コンクリート構造物のリハビリテーション 研究委員会報告」

宮川豊章\*1・武若耕司\*2・出村克宣\*3・梶田佳寛\*4・守分敦郎\*5

### <委員構成>

<b>委員長</b> 宮川豊章	京都大学大学院	<b>委員</b> 堺 孝司	香川大学工学部
<b>幹事</b> 武若耕司	鹿児島大学工学部	佐藤文則	前田建設工業(株)技術研究所
出村克宣	日本大学工学部	里山公治	鹿島建設(株)技術研究所
<b>委員</b> 上田隆雄	徳島大学工学部	田中 斉	飛鳥建設(株)技術研究所
牛島 栄	(株)青木建設技術研究所	永山 勝	(財)日本建築総合試験所
大賀宏行	東京都立大学大学院	西崎 至	建設省土木研究所
太田達見	清水建設(株)技術研究所	服部篤史	京都大学大学院
小俣富士夫	ショーボンド建設(株)	濱田秀則	運輸省港湾技術研究所
河合研至	広島大学工学部	梶田佳寛	宇都宮大学工学部
橘高義典	東京都立大学大学院	丸屋 剛	大成建設(株)技術研究所
木下 勲	日本下水道事業団	本橋健司	建設省建築研究所
佐伯竜彦	新潟大学工学部	守分敦郎	東亜建設工業(株)技術研究所
坂井悦郎	東京工業大学工学部	渡部 正	前田建設工業(株)技術研究所

### 1. はじめに

近年の我が国の経済は、一時期の浪費型構造から脱却し、安定型構造へと急速に、しかも大きく変革している。コンクリート工学の分野においても、例えば、新設構造物においてはそのライフサイクルを考慮した性能規定型の設計思想の構築が、また、既存構造物においてはその寿命評価と延命処置手法の確立が、それぞれ早急に解決されなければならない大きなテーマとなってきた。

(社)日本コンクリート工学協会(以下、JCIと称す)は、上記の課題のうち既存構造物における延命のための機能回復に関わる問題を検討する委員会として、1996年から2年間にわたって「コンクリート構造物のリハビリテーシ

ョン研究委員会」(以下、本委員会と称す)を設置した。

本報告は、本委員会におけるこれまでの活動概要について取りまとめたものである。

### 2. 委員会活動の概要

コンクリート構造物のリハビリテーションを考えるにあたり、補修・補強の設計システムは理想的には、図-1の流れで進められるべきものであると考えられる。本委員会では、この流れにしたがって補修・補強設計が確実に実施されるために必ず明らかにしておかなければならない以下の項目を主な検討課題として、活動を行った。すなわち、

#### ① 劣化損傷を受けた構造物の劣化予測と性能

\*1 京都大学大学院教授 工学研究科 工博 (正会員)  
 \*2 鹿児島大学助教授 工学部海洋土木工学科 工博 (正会員)  
 \*3 日本大学助教授 工学部建築学科 工博 (正会員)  
 \*4 宇都宮大学教授 工学部建築学科 工博 (正会員)  
 \*5 東亜建設工業(株) 技術研究所 工博 (正会員)

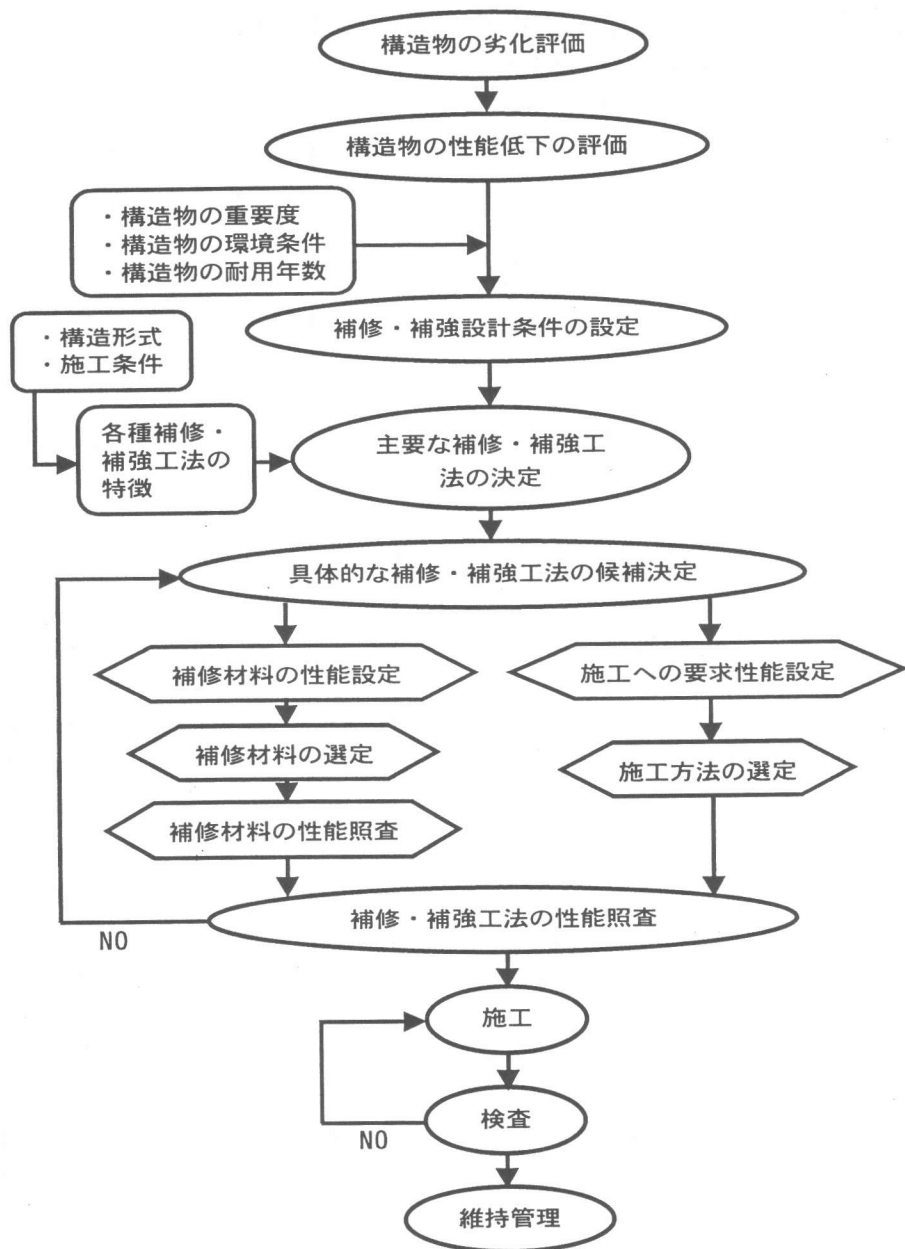


図-1 コンクリート構造物のリハビリテーションの流れ

評価に関する検討

- ② 補修・補強材料の性能評価に関する検討
- ③ 補修・補強工法の性能評価と工法選択システムに関する検討

なお、検討にあたっては、対象構造物を設定することによってより具体的なイメージがつかめるものと考え、ここでは、塩分雰囲気中や下

水道環境中などといった極めて過酷な環境下のコンクリート構造物に絞って検討を行うことにした。また、本委員会では、これらのテーマに対して、その活動を効率的に行うために、以下に示す3つの作業部会（以下WGと称す）を設置した。

- ① 構造物性能評価WG（主査：武若耕司）：補

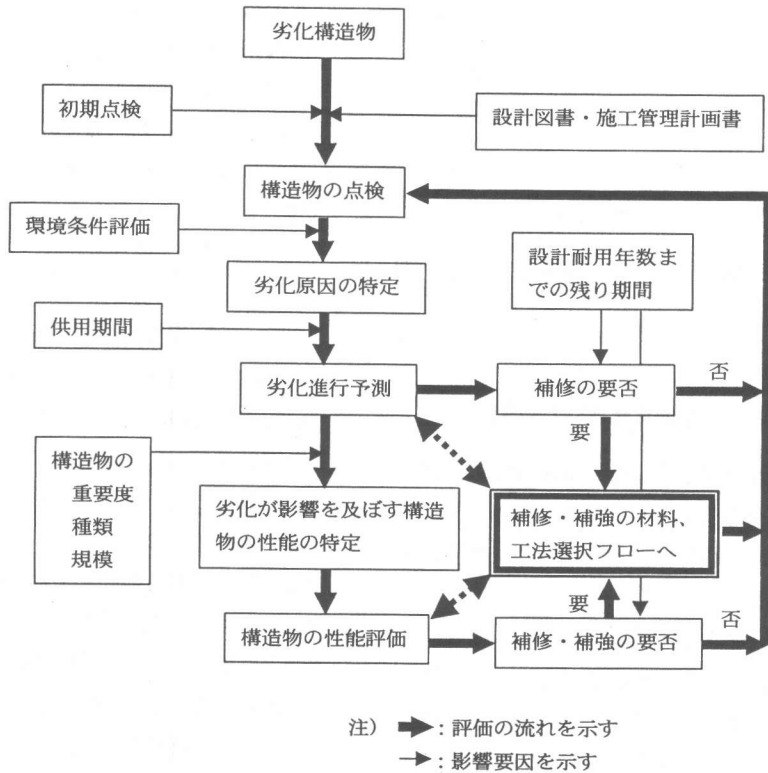


図-2 構造物の劣化評価フロー

修・補強を適材適所に実施するためには、劣化構造物の状況を把握することが重要である。このWGでは、構造物の劣化状況の適切な判定とその後の劣化進行を予測し、かつ、劣化による構造物の性能・機能の変化を正確に評価できる技術を確立することを目的としている。

② 材料性能評価WG（主査：出村克宣）：補修・補強工法の性能は、使用される材料の性能あるいはその施工状態によって大きく左右される。このWGでは、補修・補強に用いられる各種材料を分類し、それらの性能を明らかにするとともに、施工状況が材料性能に及ぼす影響の定量化を試み、補修・補強材料設計システムの構築を図ることを目的としている。

③ 工法評価WG（主査：梶田佳寛）：腐食環境下において構造物の維持管理の効率化を考えると、使用される補修・補強工法には、その効果を確実に、しかも経済的に発揮できることが求

められる。このWGでは、各種補修・補強工法の諸性能を横並びに評価し、構造物の劣化程度や性能低下に見合った工法を経済的に選択するシステムを構築することを目的としている。

### 3. 委員会の主な成果

#### 3.1 構造物性能評価WG活動成果の概要

図-2には、構造物の劣化評価作業の基本フローを示す。構造物の劣化評価作業にあたっては、まず、点検結果を基に構造物を構成する材料の劣化進行程度を把握し、またその進行の将来予測を行う。次に、構成材料の劣化に伴う構造物の各種性能の変化（低下）についても把握する必要がある。ここで問題となるのが、点検結果から構成材料の劣化を予測するために用いる劣化予測モデルおよび、構成材料の劣化と構造物の各種性能を有機的に結び付ける構造物性能評価モデルの具体的な中身である。

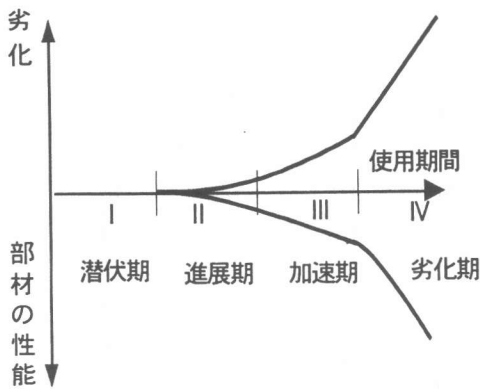


図-3 塩害劣化進行の概念図

構造物性能評価部会では、塩害環境および下水道環境の構造物に対して、これらのモデルの構築を試みた。以下には、一例として塩害評価に関する検討結果を示す。

(1) 塩害劣化予測モデル

RC 構造物の塩害による劣化進行は、一般に、図-3に示すように潜伏期、進展期、加速期、劣化期の4段階に区分して説明される。塩害劣化の予測とは、すなわち構造物が現在どの期間にあり、また、その次の状態に何時到達するかを予測することである。この図-3の具体的なモデル化にあたっては、次の2つの観点から検討を試みた。すなわち、

- ①上記の劣化段階をそれぞれにモデル化し、その組み合わせによって劣化進行を評価する方法
- ②図-3の劣化曲線を一括して評価し、劣化の進行程度を予測する方法

このうち①については、表-1に示すように、各劣化期を支配する主現象をピックアップし、

これをモデル化することによって各期の劣化-時間関係を定量化しようとするものである。主現象のモデル化にあたっては、その現象をさらに、コンクリートの品質に関わる係数  $Q_{cr}$  と環境に関わる係数  $E_{cr}$  で表現し、各期の長さ  $T_{cr}$  を次式(1)の形で表わすことを試みている。

$$T_{cr} \propto \frac{Q_{cr}}{E_{cr}} \quad (1)$$

なお、各期の基本モデルが構築されたとしても、具体的な環境条件やコンクリートの品質については構造物固有の値であり、これを定めることは容易でない。ただし、リハビリテーションの実施にあたっては、あらかじめ点検を行うことによって、モデルのパラメータを与えるために有用な情報を得ることが可能である。図-4には、塩害劣化構造物にリハビリテーションを行うにあたっての劣化予測の具体的な流れと、その際に有効となる点検情報について示す。

一方、上記②の方法は、図-3に示した劣化曲線をマクロ的に捉える考え方である。この場合、図-5に示すように、劣化曲線はコンクリートの品質や環境条件によらず相似な形であると仮定し、各構造物の耐用年数を分母として時間を無次元化すると、マクロな環境条件が同じ構造物ではこの無次元化された劣化曲線は同じとなるとするものである。この無次元化が可能となれば、構造物の条件によらず一度の調査・点検によって構造物の余寿命を推定することが可能となる。ここでは、この無次元化の可能性を中心に検討を加えている。

表-1 塩害劣化を支配する要因

	定 義	期間を支配する主要因
潜伏期	塩化物イオンが鉄筋表面において腐食発生限界量に到達するまでの期間	<ul style="list-style-type: none"> <li>・ 塩化物イオン浸透速度</li> <li>・ かぶり</li> </ul>
進展期	鉄筋腐食開始からコンクリートに腐食ひび割れが発生するまでの期間	<ul style="list-style-type: none"> <li>・ 鉄筋腐食速度</li> <li>・ コンクリートのひび割れ抵抗性</li> </ul>
加速期	腐食ひび割れ発生後の急激な腐食進行期間	<ul style="list-style-type: none"> <li>・ 鉄筋腐食速度</li> </ul>
劣化期	鉄筋腐食量の増大により、部材の耐荷力などが大きく低下していく期間	<ul style="list-style-type: none"> <li>・ 腐食ひび割れ幅</li> </ul>

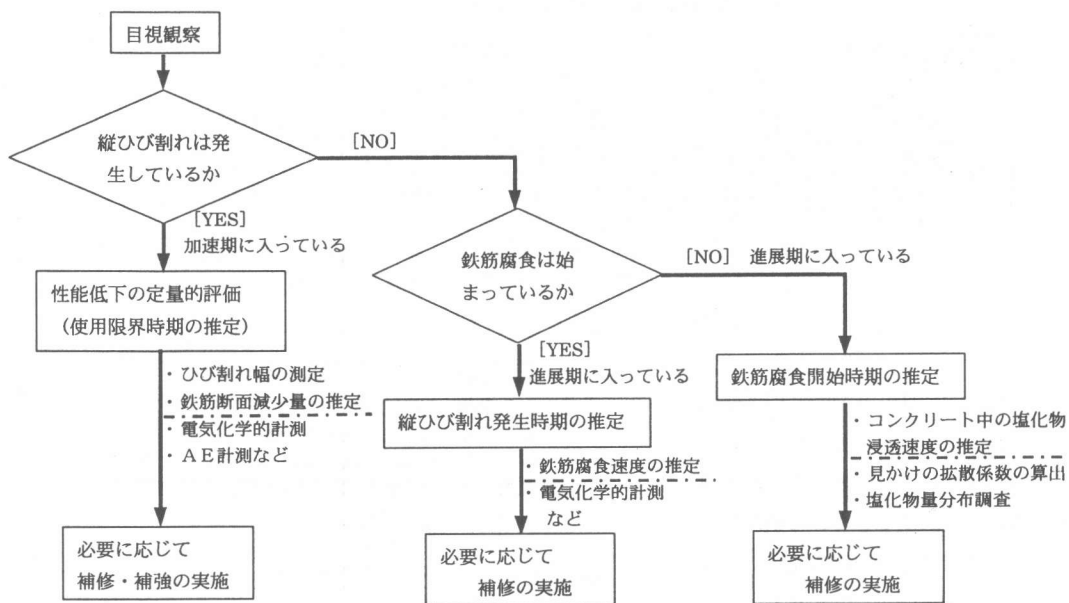


図-4 塩害劣化予測の具体的な流れ

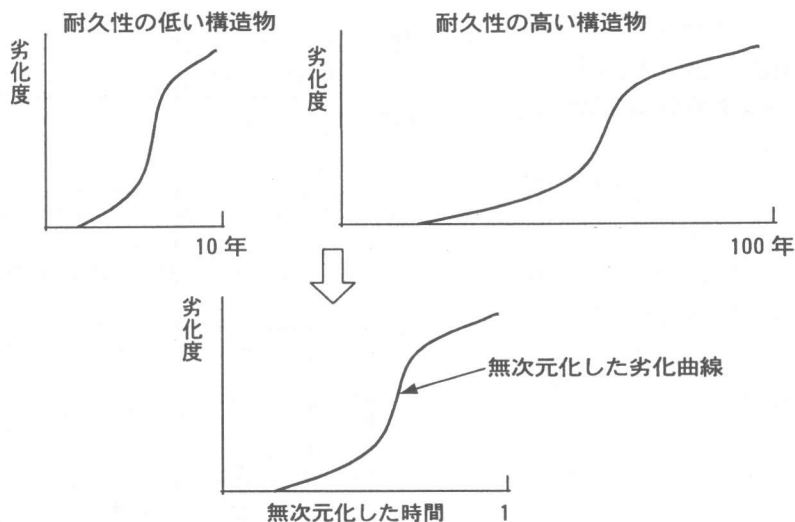


図-5 塩害劣化曲線の無次元化の概念

(2) 構造物の性能低下予測モデル

構造物に劣化が生じて、その構造物の有する機能が使用者や管理者の要求する状況を満足していれば、本質的にはその構造物に問題は生じていないと見なせるはずである。ただし、構造物の機能を直接評価することは難しいため、通常は、表-2に示すような構造物の性能が、

その要求性能のレベルを満足していることによって構造物の機能が満足しているものとしている。いずれにしても、構造物が劣化している場合には、劣化による構造物の各性能の低下状況を把握し、それぞれがその要求性能を満足しているかどうかを判断する必要がある。

ここでは、まず、構造物を構成する材料、す

表-2 構造物の要求性能とそのレベル

構造物の性能	要求性能のレベル
耐荷性	最大耐力が〇〇tonf以上であること
たわみ性	橋梁やスラブ下端などでのたわみ量が△△mm以下であること
耐震性	部材角が××%までは崩壊しないこと
耐疲労性	応力比〇〇で繰返し回数 200 万回まで耐えうること
水密性	ひび割れなどによって漏水しないこと
対人安全性	腐食ひび割れによるコンクリートの剥落で人を傷つけないこと
美観	鉄筋腐食による錆汁によって外観を汚さないこと (人に不安を与えないこと)

なわちコンクリートや鉄筋の性能低下の状況を検討し、その後、これら材料の劣化によって表-2に示す構造物の性能が低下していく状況を、それぞれの性能ごとに定量的に把握することを試みた。図-6および7には、それぞれ、腐食鉄筋の材料としての物性低下の状況および、構造物としてのはり部材の耐荷性低下状況に関する試算結果の例を示す。

### 3. 2 材料性能評価WG活動成果の概要

補修・補強材料の性能評価は、各補修・補強工法に対して、その工法に要求される性能を最も有効に発揮する最適材料の選択に不可欠である。すなわち、ここでの検討は、補修・補強材料設計法を確立させることに集約される。図-8はその一例で、補修を中心と考えた材料設計の流れに関する検討結果である。以下では、この図を基に、このWGで検討された補修・補強材料設計の主な流れについて概説する。

#### (1) 補修・補強材料の基本設計

例えば補修材料をその機能によって大別すると、ひび割れ注入材、表面被覆材、断面修復材およびその他の材料に分類される。その他の材料としては、電気化学的補修工法に必

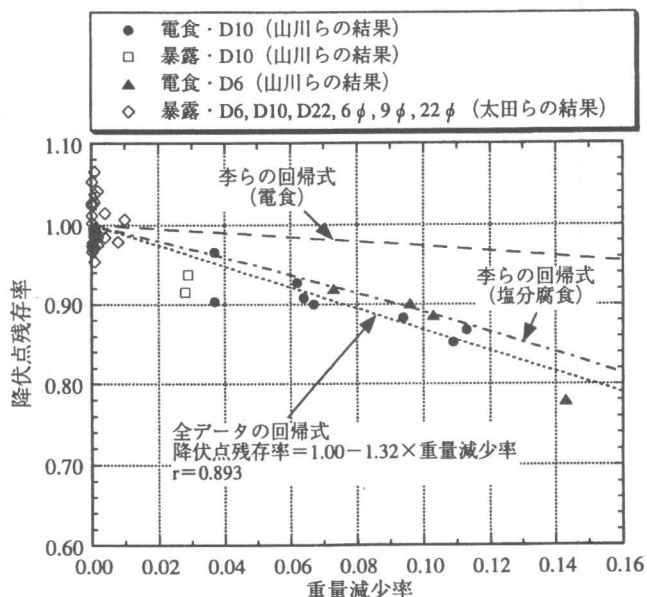


図-6 鉄筋腐食減量率と降伏点残存率の関係

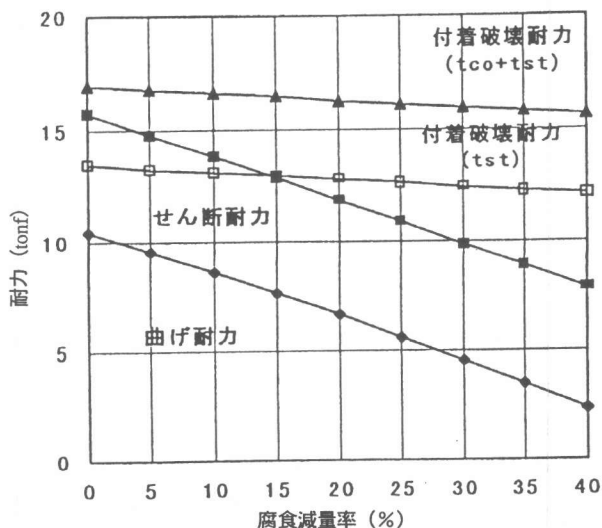


図-7 はり部材の耐荷力と腐食減量率の関係の試算結果

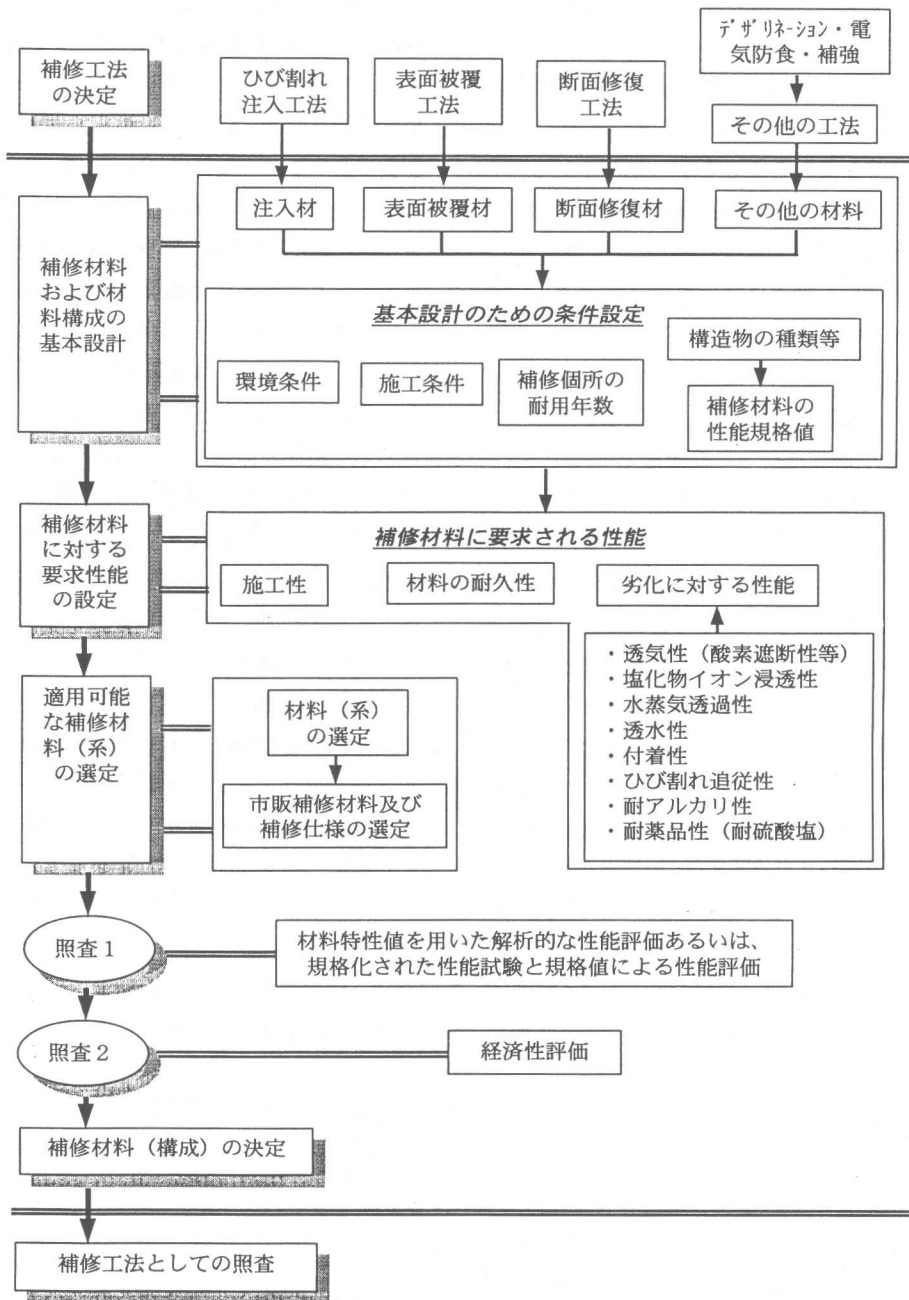


図-8 補修材料設計の流れ

要な材料などがこれにあたる。これらの枠組みは明らかに補修工法と対応するものである。すなわち、補修あるいは補強工法が決定されると、使用材料は必ずその工法に対応した枠組みの中の材料に限定されることになる。ただし、工法によっては、その枠組みの中の材料を複数組

み合わせて使用する場合や、枠組みを超えて組み合わせて使用する場合も考えられる。

材料の選定にあたっては、まず、各枠組みの中にどのような種類のものがあり、また、それらの基本的な性能がどのようなものであるか、さらに、材料を組み合わせて使用する場合の基

本的な考え方やその組み合わせの可能性などについて明確にしておく必要がある。

次に、それぞれの枠の中でどの材料を選択するかについては、構造物に生じている劣化現象ならびに劣化過程、施工条件、構造物の余寿命および、状況に応じて公的機関が要求している性能規格値などが、基本の選択条件となる。すなわち、補修・補強材料の基本設計とは、これらの条件それぞれに対して一定の判断基準を設け、これを基に、利用可能な材料の候補を1種類あるいは複数種類選択することである。

### (2) 要求性能の設定と性能照査

上記で候補となった材料が最終的にリハビリテーションとして使用されるためには、その材料が補修あるいは補強材料として要求される性能を十分に確保していることを何らかの方法で確かめなければならない。その際、例えば補修材料の要求性能についてみると、第一に劣化因子からの保護性能を挙げることができる。この性能について、例えば塩害を例にとると、塩化物イオン透過性、酸素透過性、水蒸気透過性、ひび割れ追従性、付着性等がこれにあたる。

候補となった補修・補強材料が本当に妥当なものであるかどうかについては、その材料が有する上述の各性能が、それぞれに要求される水準以上であることを照査することによって確か

めなければならない。また、補修・補強材料の性能は、実施工後に確実に保持されており、さらに、所定の期間中、要求水準以上に保たれている必要もある。従って、補修・補強材の性能照査においては、これらが確実に施工できる性能ならびに、材料自身の耐久性も併せて照査できることが必要である。図-8中の照査1では、以上のことを考慮した補修・補強材料の具体的な性能照査方法について示すことになる。

一方、補修あるいは補強材料の候補が複数あり、それらがいずれも照査1をクリアする場合、あるいは補修・補強工法の候補が複数ある場合等では、材料のコストも重要な照査項目となる。照査2では、この点について検討を行うことになる。

### 3. 3 工法評価WG成果の概要

腐食環境に建設されたコンクリート構造物の維持管理を効率的に行うためには、求められる効果を経済的に発揮できる補修・補強工法の選択方法を確立することも重要である。そして、このためには、構造物の劣化進行に伴う性能低下と補修・補強工法の特徴を考慮に入れて、「失敗のない工法」を選択することから始めなければならない。工法評価部会では、このような補修・補強工法の選択システムを確立するために以下の点について検討を行った。

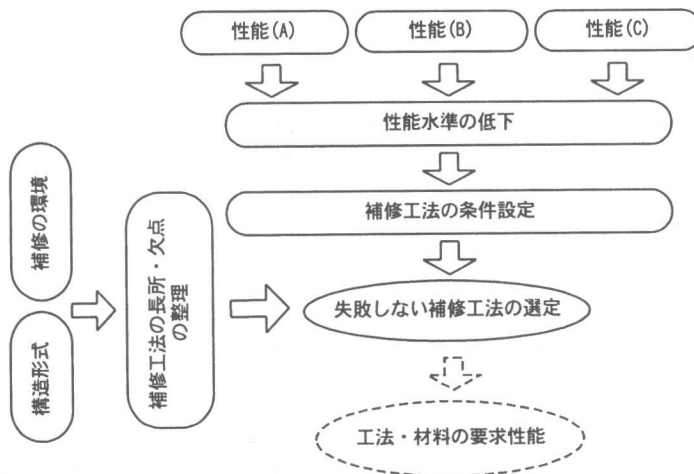


図-9 失敗しない補修工法の選択システム



表-3 補修工法選択の例（構造形式：RC、環境条件：海上大気中）

性能	鋼材を保護する性能				水密性				対人安全性				靱性				たわみ性				耐荷性				耐疲労性				
	潜伏期	進展期	加速期	劣化期	I	II	III	IV	I	II	III	IV	I	II	III	IV	I	II	III	IV	I	II	III	IV	I	II	III	IV	
劣化過程	I	II	III	IV																									
性能水準の低下のグレード	グレード I	グレード II	グレード III	グレード IV	0	I	II	III	0	I	II	III	0	I	0	I	II	III	0	I	II	0	I	II	0	I	II	III	
海上 橋	A	ひび割れ補修工法	◎	○	△		◎	○	△		○	○					○												
	B	表面被覆工法	◎	○	△		○	◎	○		◎	◎			△		○	○			△	△		△	△	△	△	△	△
	C	断面修復工法		○	○	◎			◎	◎		◎	○				○	○			○	○		○	○		○	○	○
	D	電気化学的脱塩工法	○	◎	○			○	△	△		△	△		△	△		○	○		△	△		○	○		○	○	
	E	電気防食工法	○	◎	○	◎		○	△	△		△	△		△	△		○	○		△	△		△	△		△	△	△
	F	鋼板・FRP接着工法							△				◎		◎		◎		◎		◎	◎		◎	◎		◎	◎	◎
	G	補強																◎			◎				◎			◎	◎

注 ◎：主工法として適用可能  
 ○：補助工法として、主工法の性能を保持するために適用  
 △：補助工法として、構造物の劣化状況などに応じて適用

(1) 構造物の性能低下を考慮した工法選択システム

補修・補強工法は、劣化した構造物の要求性能の低下に対応できる工法であるとともに、適用する工法の長所が十分に発揮できるものでなければならない。図-9は、その流れを示したものである。図中の縦方向の流れは、構造物の

性能低下を評価し、補修・補強の目的とそれらの具体的な方法の大枠を検討するものである。一方、横からの流れは、構造物の形式や環境条件を考慮して、適用が難しい工法を除外し長所を発揮できる工法を絞り込むものである。そして、この2つの流れを満足するものが、「失敗の生じない工法」ということになる。

表-4 棧橋における補修コスト試算の例

劣化程度	潜伏期 I	進展期 II	加速期 III	劣化期 IV
補修工法				
1. 劣化部分のみ断面修復(小断面)し、表面塗装を行った場合	1.0	1.6	2.4 - 4.5	4.5 -
2. 発錆限界値を越えた塩化物量を含むコンクリートを取り除き、断面修復(大断面)を行った後に表面塗装を実施した場合		5.0	7.9 - 8.9	8.9
3. 劣化部のみ断面修復(小断面)し、それ以外の部分に電気化学的脱塩工法を適用した場合	3.5 (6.3*)	4.6 (6.4*)	5.9 - 7.2*	7.9* -
4. 劣化部のみ断面修復(小断面)し、それ以外の部分に電気防食を適用した場合	4.5	4.9	5.5 - 7.2	8.9 - 11.1

注 1) \*は表面塗装を実施した場合の費用を示す。  
 2) コスト試算の条件は次のとおりである。

1	棧橋の部材はほぼ同様な劣化状態と仮定する。
2	初期補修費用のみを対象とする。(トータルコストは検討対象外)
3	すべてのコストは、点数で表示した。点数の計算は以下の条件を仮定した。 表面塗装工法を1点/m <sup>2</sup> と仮定。足場工は施工期間と関係するが、おおよそ0.6から0.7点/m <sup>2</sup> とし、コンクリートのはつりは4点/m <sup>2</sup> 、大断面修復は6点/m <sup>2</sup> 、小断面修復は3.5点/m <sup>2</sup> と仮定した。電気化学的脱塩工法は劣化程度に応じて6.5~7.5点/m <sup>2</sup> 、電気防食は劣化程度に応じて5.5~6.0点/m <sup>2</sup> と仮定した。電気防食には、通電管理の費用は考慮しない。
4	劣化レベルとしては、(財)沿岸開発技術センターの劣化度判定標準 <sup>2)</sup> に従い、劣化度0が潜伏期、劣化度Iが進展期、劣化度II, IIIが加速期、劣化度IV, Vが劣化期と仮定した。

表-3には、構造物の形式が鉄筋コンクリート構造であり、環境条件が海上大気中である場合に対して、塩害劣化構造物における性能低下の状況に見合った補修工法の選択例の絞り込みを行った結果を示した。この様な表を用いることによって、複数の性能について低下が認められる構造物に対しても無駄無く補修・補強工法を選択することができるようになる。また、逆に、選択した補修・補強工法の有効性の照査を行う場合、この表を満足しているかどうかの判断によって照査に代えることも可能となる。

## (2) 補修工法のコストパフォーマンス

上記の表-3を用いた補修工法選択システムにおいては、コストについての考慮はなされていない。しかし、現状の補修工法の選択はコストに大きく依存していることを考えると、補修あるいは補強効果とコストに関する議論を避けて通る訳にはいかない。

ここでは、いくつかの構造物を例に取り、構造物の劣化状況毎に各種補修・補強工法のコストを算出し、相対比較を行った。その一例として、RC栈橋の塩害補修における場合の結果を表-4に示す。なお、この表中の網掛け箇所は、表-3より、各劣化状態で推奨される工法を示している。この表では、コストが安いものが必ずしも最適な補修工法ではないことを明確に示しているが、その一方で、劣化の初期段階で予防保全的に補修を施すことが、コストの面からも極めて有利であるということも確認できる。

いずれにしても、効果的でしかも経済的な補修・補強工法の選択は、まず、表-3のようなリストを作成し、補修あるいは補強効果が確実に得られる工法をリストアップし、その中から表-4などを参考として最も経済的な工法を選定することであるといえる。

## 4. あとがき

本委員会の基本的な活動は本年3月をもって終了したが、その成果の取りまとめについては、10月に報告書を出版することを目指して、現

在その作業を行っているところである。この報告書の中では、将来の「過酷環境下のコンクリート構造物の補修・補強に関するガイドライン」作成を目指し、その考え方についても提示する予定にしている。またこの出版に合わせて、下記の要領でシンポジウムを開催して、委員会成果の報告を行うとともに、劣化とリハビリテーションに関して広く意見を募り、議論を行うことを考えている。

### 「コンクリート構造物のリハビリテーション」に関するシンポジウム

実施期日：1998年10月23日(金)

開催場所：大東京火災新宿ビル B1 ホール  
(東京都渋谷区代々木3-25-3)

内 容：① 委員会報告  
② 論文講演(自由投稿論文)

さらに、本委員会におけるリハビリテーションに関する検討は、塩害環境および下水道環境といった極めて苛酷な環境に限定して進められ、これらの環境における劣化対策の在り方については、一応の成果が得られたものと考えている。しかし、実際には、このほかにも種々の環境下のコンクリート構造物に対して種々の劣化が存在し、これを補修・補強するためには、それぞれに特有の検討項目が存在する。

そこで、これらの劣化状況を総合的に見たりリハビリテーションの在り方を取りまとめることを目的として、JCIの中に本年度から2年間の予定で、「コンクリート構造物の複合劣化と維持管理計画研究委員会」が発足した。したがって、本委員会の成果は、この新たな委員会に引き継がれ、更にグレードアップするものと期待している。

最後に、本委員会による研究活動の機会をお与え戴いたJCIならびに、本委員会の親委員会にあたるJCI「研究委員会」(委員長：魚本健人東大生研教授)に心より感謝致します。