

[委員会報告]

防食研究委員会報告

—鉄筋腐食による損傷を受けたコンクリート構造物の補修技術—

防食研究委員会委員長

蒔田 実

1. 防食研究委員会活動の概要

(社)日本コンクリート工学協会の研究委員会(当時委員長:岡村 甫教授)では、近年のコンクリート構造物の劣化問題に関して、劣化構造物の補修技術に関する調査研究を実施する目的で、昭和61年度から「防食研究委員会」を発足させ、平成元年3月末をもって終了した。この委員会の構成は以下に示す通りである。

委員長	蒔田 実				
委員兼幹事	塚田 卓	米澤 敏男			
委員	伊部 博	池永 博威	魚本 健人	大即 信明	
	大浜 嘉彦	片脇 清士	樫野 紀元	小林 明夫	
	小林 一輔	小林 豊治	鈴木 智郎	関 博	
	田沢 栄一	田辺 弘往	竹本 孝夫	辻 恒平	
	土門 勝司	船戸己知雄	松岡 康訓	三浦 尚	
	宮川 豊章				
通信委員	太田 利隆	具志 幸昌	武若 耕司	渡辺 明	

防食研究委員会では、その活動として補修に関して最も基本的な問題をおおくかかえている鉄筋の腐食によるコンクリート構造物の損傷に焦点を絞り、補修技術の現状を取りまとめることとシンポジウムの開催を計画した。補修技術の現状を取りまとめるに当たっては2年以上の期間をかけ、文献調査のみならずコンクリート構造物の管理者および材料メーカー・施工業者等に対するアンケート調査を実施し、現在どのような考えで、またどのような補修が行われているかを調査した。これらの調査結果をもとにして、鉄筋の腐食機構から考えられるあるべき姿を基準として、委員会報告「鉄筋腐食による損傷を受けたコンクリート構造物の補修技術—技術の現状—」をとりまとめた。平成元年1月18日には、計画通り「鉄筋腐食による損傷を受けたコンクリート構造物の補修技術に関するシンポジウム」を開催した。シンポジウムでは21題の研究発表、パネルディスカッション、22社の展示発表が行われたとともに、上記の委員会報告「技術の現状」も紹介した。なお、このシンポジウムには、当協会会員のみならず他学協会の参加者も1/3以上を占め、当初の予想を大幅に上回る約400名の参加者があった。

このシンポジウムでも明らかになったように、当委員会で取り上げたテーマは、コンクリート構造物にとって非常に重要であり、多くの技術者にとって関心が高い問題であるばかりでなく、コンクリート技術者だけでは十分対処しきれない境界領域の問題である。今後さらにこの種の問題に対処すべく新たな研究委員会を設け、長期的な視点から同様な調査研究を継続するようことが必要であると考えられる。

以下に当委員会でまとめた委員会報告の概要を紹介するが、詳細は委員会報告を参照されたい。

2. 鉄筋腐食による損傷を受けたコンクリート構造物の補修技術－技術の現状－

2.1 劣化原因および劣化度の判定

鉄筋の腐食によるコンクリート構造物の損傷の外観については、一般的にそれほどの相違はみられないが、その劣化機構については大きく分類して塩害によるもの、中性化によるものに分類することができ、特異な例として電食などが挙げられる。これに対し、劣化原因には、かぶり不足、外部塩分の侵入、海砂の使用、施工不良など多種多様なものがある。

劣化した構造物の特定から補修工法の選定まで一般的に行われていると考えられる方法（考え方）を図1に示す。

まず、定期点検等により劣化した構造物（部材）の特定を行った後、劣化状況、劣化原因を把握するために、構造物の診断を行うわけであるが、実際に行われている劣化調査手法としては目視検査、打診等、その大半が概略調査に分類される項目であった。補修補強は劣化機構に即した形で行われなければならないが、そのためには確固とした劣化度判定の流れが必要である。さらに、劣化度判定は材料のみによるものでもなく、構造のみによるものでもなく、これら両者が一体となった視点によることが原則である。しかしながら、現在の段階では、非破壊測定手法を含めた調査手法がまだ実務的に確立されているとは言いがたく、しかも判定の指標もコンセンサスが得られていない現状が明らかにされた。

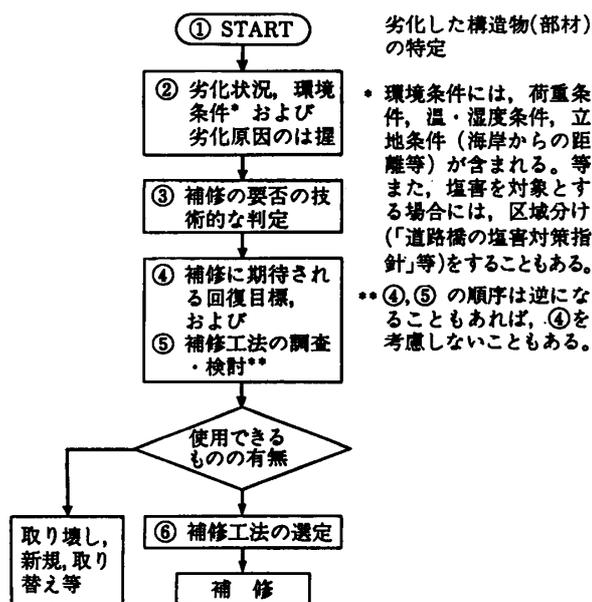


図1 現状での一般的な補修までの考え方

2.2 補修の要否と補修工法の選定の考え方

一般に構造物の補修の要否の判定は劣化原因および劣化度判定を受けて行われるが、ここでは次の文献に見られる補修の要否の考え方を例として紹介した。

- 「建造物保守管理の標準・同解説」（鉄道総合研究所）
- 「鉄筋コンクリート造建築物の耐久性向上技術」（(財)国土開発技術研究センター）
- 「劣化防止・補修マニュアル（案）」（(財)沿岸開発技術研究センター）

現実には、「第三者への障害の可能性の有無」が補修の要否を判定する上での一番のポイントと考えられていること、また、予算上の都合が優先され易いなど種々の問題点が指摘されている。なお、コンクリート構造物の補修設計が新設構造物の設計に比較して学問としての体系化が遅れ、未だ対症的なアプローチが多いことによる欠点が多く、予防保全的なものはほとんど行われていないため、対策が後手となっているものと考えられる。

2.3 補修方法および材料（電気防食を除く）

現在、主に用いられている補修方法および補修材料について、各メーカーへのアンケート調査、カタログ調査を主に整理を行うとともに、補修材料および材料に関する特徴、問題点を文献調査により補足した。

実際に行われている補修方法を整理して分類すると図2に示す組み合わせとなる。また、アンケ

ートによる市販の補修工法の組み立てを見ると、おおよそ図3に示すように分類される。現在、市販の材料、工法は多数あるが、この結果からみても工法の種類は意外に少なく、下地処理・鉄筋防錆処理・断面修復・表面処理の工程からなる手法に含まれるものが大部分であった。

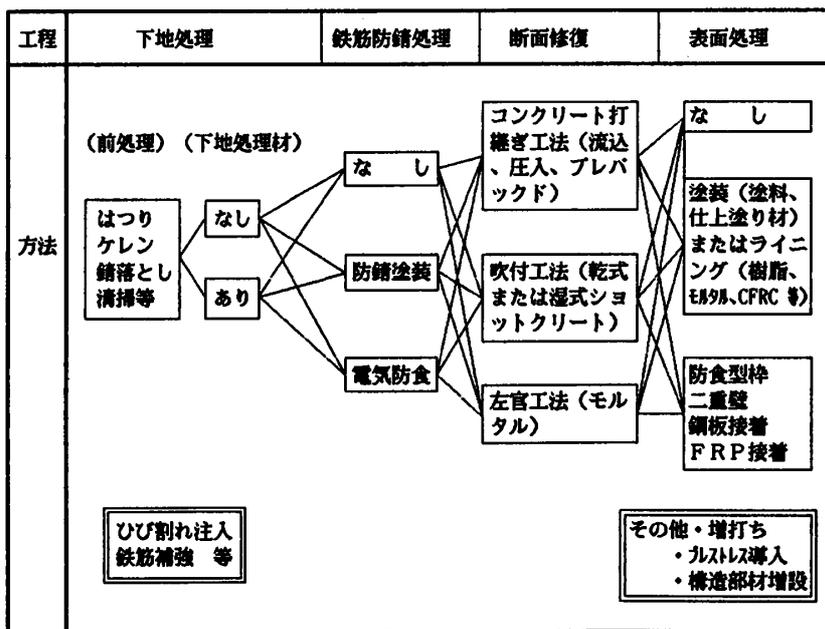
しかし、劣化原因によっては各工程で材料に要求される性能は大きく異なる筈であり、現在用いられている仕様が全てに対応が可能であるとは考えられない。また、劣化の度合と補修工法の選定の関係も明確になっていないのが現状である。従って、今後、劣化機構に応じた特徴ある仕様の開発とともに、全く新しい補修工法の検討も必要となると思われる。

2. 4 補修方法および材料（電気防食）

電気防食は、外部から金属（鉄筋）に直流を負荷し、金属を錆びない、ないしは実質的に錆びないと考えられる状態に保持するものである。従って鉄筋腐食によって損傷を受けた構造物の補修ないしは劣化停止技術としては、原理的にはきわめて明快であり問題が少ない。しかし、実際のコンクリート構造物への適用に当たっては、いくつかの注意を要する問題がある。それらは、

- 1) 鉄筋の防食基準、2) 電気防食の設計方法、3) 陽極材料、4) 施工法の4つの問題である。

鉄筋の防食基準としては、この方法が、従来、米国を中心に研究が行われてきた背景もあって、NACEの地中埋設管の防食基準が準用されることもあったが、最近では、コンクリート中の鉄筋に固有の防食基準が用いられるようになってきた。この中で、現在では、外部電源により0.1Vの電位変化を与えるという電位変化をベースにした基準が有力になっている。ただし、マクロセルを消滅させることを目的に、全ての構造物中の電位を防食前の最も卑な電位よりも卑にするという電位をベースとした基準も重要である。



—— 線内は本資料の対象外

図2 補修方法の分類・組み合わせ

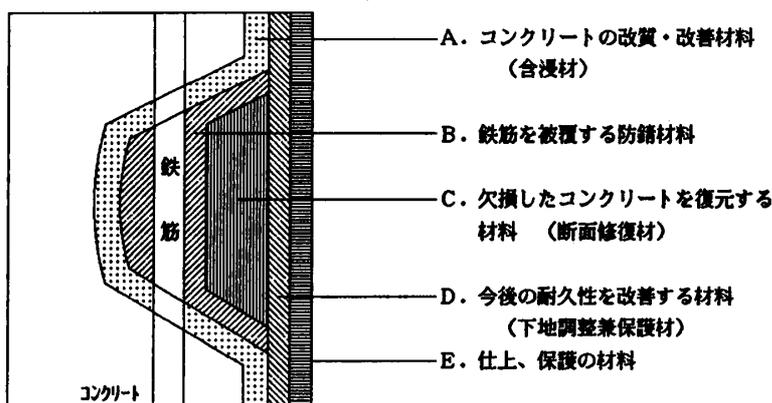


図3 補修方法の組み立て

電気防食の設計においては、防食電流密度と電流分布の設計が重要である。今までになされた研究によれば、コンクリート構造物の防食電流密度は $10\sim 30\text{mA}/\text{m}^2$ であり、長期的には $10\text{mA}/\text{m}^2$ 程度となる。従って、設計値としては、 $20\text{mA}/\text{m}^2$ 程度が妥当である。コンクリート中の鉄筋の場合のように抵抗の高い環境（コンクリート）では、一様な電流分布を得るのが難しいため、陽極の配置に留意し、できるだけ均一な電流分布が得られるようにしなければならない。

陽極材料に用いられているのは、1)導電性プラスチックの線状または網状陽極と導電性モルタルの組合せ、2)白金線と導電性塗料の組合せ、3)チタン基金属酸化物網状陽極、4)コンクリート表面に溶射した亜鉛陽極、等である。このうち、2)と3)の方法が今のところ優れている。

防食用の電源としては、手動電圧式または自動電圧式のシステムがあり、シリコン整流器が使用される。コンクリート構造物では、各部位で電位が大きく異なったり、抵抗が変化したりするので、手動電源装置を用いて定電圧を負荷することが多い。図4に試験的に施工している電気防食の例を示す。

鉄筋の腐食により劣化したコンクリート構造物の補修に対する電気防食の適性は、技術的な問題と経済性のいずれにおいても、まだ十分には評価しきれてはいない。原理的に明快であり、本質的に有効な補修手段となり得る技術であるだけに、さらに総合的な研究開発の進展が望まれる。

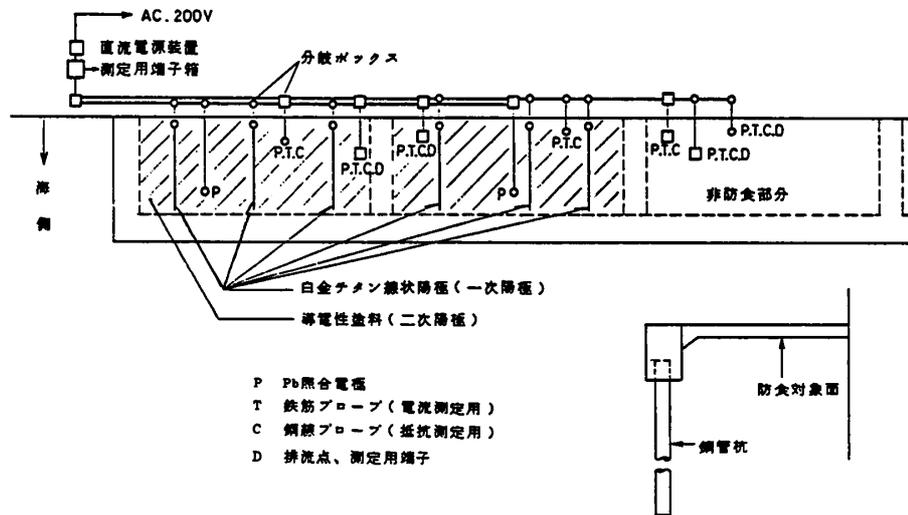


図4 栈橋スラブ下面電気防食施工例

2. 5 補修工法の評価および選定方法

鉄筋の腐食により生じた劣化損傷に対して補修が必要であると判定した時、劣化の程度、構造物の重要度、補修に期待する寿命等を定性的に考慮して補修法が選定されている。例えば、塩害により劣化した橋梁に関する建設省の報告によれば、損傷度を表1に示すように、外観調査、塩分含有量、自然電位の値に応じてI～IIIの三段階に区分し、これに応じて、表2に示す補修法を用いることを定めている。このタイプの補修方法の選定法は、鉄道構造物、港湾構造物、建築物いずれの規準類においても、ほぼ同様に定められている。この方法は、きわめて定性的であるが実用的には有用である。これは、また、技術的には補修方法を定量的に評価することが必ずしも容易ではないにもかかわらず、劣化した構造物の補修は行わなければならないという現在の矛盾の表れと解釈することができる。

補修に用いる材料と鉄筋腐食の程度あるいは補修に期待する寿命との関係も、今の所必ずしも明確なものがあるとは言えない。表3は、英国コンクリート協会が推奨する損傷状況と補修材料との対応関係であるが、定性的には理解し易い考え方の一例である。

表4は、道路公団で定めている塗装材料の品質規格である。腐食との関連で、遮塩性や酸素透過性、中性化抑止作用等が定量的に定められている点が注目される。塗装材料は、補修材料の中では、腐食との量的な関係を定め易い材料と言えるが、補修材料の性能を腐食との関連で定量的に定めることは、今後必要とされる技術の方向の一つである。これに対し、他の補修材料の性能と鉄筋の防食との関連を定量的に評価することが難しいのは、これが、材料の性質のみで定まるものではなく、施工の良否に影響される所が多いためである。材料と施工の両方を含めて補修部の寿命を総合的に評価してゆく研究が必要とされている。

2.6 補修後の点検・調査

補修後の点検・調査には、補修工事の竣工検査、補修後長期の点検・検査、再補修の要否の判定、点検・調査データの記録等、いくつかの事項が含まれているが、補修後の点検・調査の必要性、目的、概念が一般化されているわけではない。

補修部の寿命が構造物の耐用年数に比べて著しく長ければ、補修後の点検・調査は不要であろう。補修部の寿命が構造物の耐用年数よりも短い場合でも、寿命が明らかであれば、何らかの対応が必要な時期を定めることが可能であり、補修後の点検・調査は不要となろう。しかし、コンクリート構造物の補修に用いられるポリマーセメントモルタルを主体とした現在の補修技術の寿命が、構造物の耐用

表1 損傷度区分

損傷度	I	II	III	損傷なし
補修の要否	要	要	要	否
外観調査結果	鋼材の発錆により部分的あるいは連続的にコンクリートのひびわれ、剥離、錆汁がみられたりその断面が欠損し、鋼材が露出または破断したりしている。	点状錆が認められるが、コンクリートの表面にひびわれや剥離等の変状がほとんどない。	外観に異常はないが、周辺の同種の構造物に塩害による損傷が生じており、今後被害が生じる恐れがある。	外観および周辺の同種の構造物に異常がない。

表2 含有塩分量、自然電位と鋼材の腐食状況

損傷度	I	II	III	損傷なし
	A		B	
	鋼材が腐食する場合が多い		鋼材の腐食が軽度あるいは無い	
含有塩分量	0.15%以上		0.15%未満	
自然電位差	200mV以上		200mV未満	

- 注) 1) 含有塩分量は鋼材位置での値を示す。
- 2) 自然電位は飽和甘こう電極を用いた場合の値である。また、表中の電位差は絶対値で示している。

表3 損傷度と補修工法の対応表

補修工法	断面修復	表面被覆
I	損傷しているすべての箇所について行う。	露出している鋼材は前処理で保護した後被覆系Iでコンクリート表面を被覆する。
II	部分的に損傷のある箇所について行う。錆びたインサート等も出来るだけ防錆処理をする。	部分的に露出している鋼材は前処理で保護した後被覆系IIでコンクリート表面を被覆する。
III	—	被覆系IIIでコンクリート表面を被覆する。

表4 コンクリート補修用材料の選定

補修用材料	大面積の欠損	小面積の欠損	ひび割れ注入	構造ひび割れ補修	接着剤
	かぶり(mm) >25 12-25 6-12	かぶり(mm) 12-25 6-12			
コンクリート 吹き付けコンクリート セメント・砂モルタル	★				
ポリマーセメントモルタル	★	★			
エポキシ樹脂モルタル	★	★			
ポリエステル樹脂モルタル		★			
耐水性エポキシ樹脂					★
SBR、アクリル及び共重合樹脂エマルジョン			★		★
低粘度ポリエステル及びアクリル樹脂			★		
低粘度エポキシ樹脂				★	
PVAc (酢酸ビニル) 接着剤	外部補修に適さない				
PVAc (酢酸ビニル) 混和モルタル	外部補修に適さない				

年数に比べて著しく長いと考えるのは困難である。従って補修後の点検・調査を前提としない限り、実用に供することが困難なのが、現在の補修技術であるということができよう。補修後の点検・調査の重要性は、まさにこの点にある。

当委員会では、国内外の規準類における補修後の点検・調査の現状を調べたが、その結果、多くの規準類で、何らかの形で補修後の点検・調査に言及していた。ただし、コンクリート構造物を管理している諸団体に対して行ったアンケート調査の結果によれば、図5に示すように、実際には補修後の点検・調査を行っていない場合がきわめて多いことが判明し、これが、現在実施されている補修工事の不十分さの一つと考えられた。一方、同じく図6に示したアンケートの結果では、補修後の点検・調査の必要性を前提とした上で、さらに非破壊調査技術の実用化を望む声も強かった。

補修後の鉄筋の腐食状況を調べる非破壊診断技術としては、腐食電位の測定と分極抵抗の測定が考えられている。腐食電位の測定は、技術としては実用化レベルに達しているが、分極抵抗法は、現在さかんに研究開発が行われている所であり、実用化までには、さらに相当の研究が必要である。

補修部の再劣化によるひびわれやはく離の非破壊診断法としては、現在と将来のいずれにおいても、目視や打診が有効であり、有力であるが、効率的で客観的な測定方法として、サーモグラフィや音響学的方法、あるいは、これらとコンピュータ画像処理技術を組み合わせた方法等、現在、技術開発が進んでおり、今後の実用化が期待される。

表5 塗装材料の規格

項目	試験条件	規格	対象層
塗膜の外観	標準養生後	塗膜は均一で、流れ・むら・ふくれ・われ・はがれのないこと。	全体塗膜
	促進耐候性試験後	白亜化はなく、塗膜にふくれ・われ・はがれのないこと。	
	湿冷繰返し試験後	塗膜にふくれ・われ・はがれのないこと。	
	耐アルカリ性試験後	同上	
しゅ塩性	標準養生後	塗膜の塩素イオン透過量が 5.0×10^{-2} mg/cm ² 日以下であること。	主材および仕上げ材
酸素透過阻止性	標準養生後	塗膜の酸素透過量が 5.0×10^{-3} mg/cm ² 日以下であること。	
水蒸気透過阻止性	標準養生後	塗膜の水蒸気透過量が 5.0mg/cm ² 日以下であること。	
中性化阻止性	中性化促進試験後	中性化深さが 1mm以下であること。	全体塗膜
コンクリートとの付着性	標準養生後	塗膜とコンクリートとの付着強度が 10kg/cm ² 以上であること。	
	促進耐候性試験後		
	湿冷繰返し試験後		
	耐アルカリ性試験後		
ひびわれ追従性	標準養生後(常温時)	塗膜の伸びが 0.4mm以上であること。	主材および仕上げ材
	標準養生後(低温時)	塗膜の伸びが 0.2mm以上であること。	
	促進耐候性試験後(常温時)		

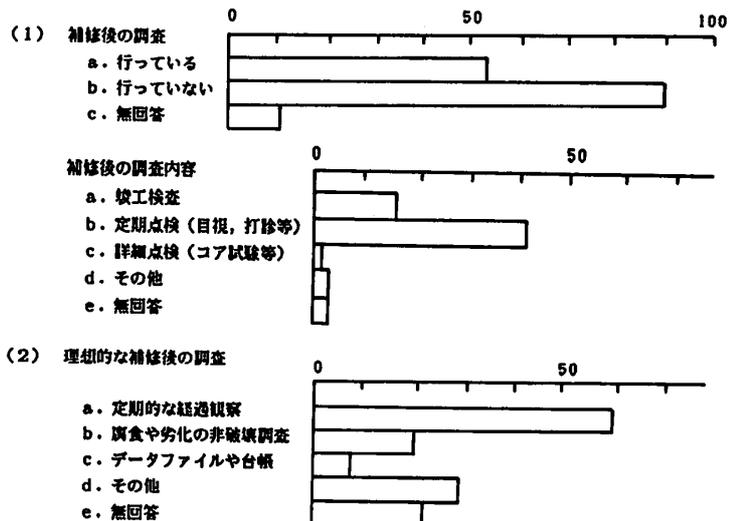


図5 補修後の点検・調査に関するアンケート調査結果