

コンクリート構造物の劣化と維持管理技術

Deterioration and Maintenance Technology of Concrete Structures

長瀧重義†

Shigeyoshi Nagataki

Abstract: Repair of concrete structures has been a focus of attention in recent years not only in Japan but also worldwide. Concrete structures have fallen short of expectations at the time of construction—they should have been perpetual and maintenance-free. However, investigation into their premature deterioration reveals the primary causes: Concrete was made using inadequate materials and/or inadequate mixture proportions due to insufficient consideration and was placed inadequately under insufficient execution control. The secondary causes include insufficient consideration at the time of construction for the environmental conditions to which the structures were to be exposed. In any event, in the current economic climate, structures cannot be demolished and rebuilt as soon as they are damaged, but instead are expected to continue to be in service as long as possible with appropriate repair or retrofitting. This paper analyzes the causes of deterioration requiring repair and introduces relevant repair techniques. At the end, the repair project of the Sanyo Shinkansen Line in which the author was involved through committee activities is reported.

1. Introduction

コンクリートの耐久性、特にこの耐久性に起因するコンクリート構造物の補修・補強が研究面から、また実際の構造物の現象として話題になったのはかなり昔のことである。例えば RILEM の開催である Durability of Building Materials and Components と題する国際会議も3年に1回の開催であるにも拘らず既に9回目を開催している。また本年韓国で開催される Concrete Under Severe Conditions (CONSEC) も4回目の開催である。しかし、セメントコンクリートの歴史が数千年、現代のセメントの開発から180年、鉄筋コンクリート(150年)、プレストレストコンクリート(120年)の歴史からみると比較的新しい事象とも言える。何故か？それはコンクリート構造物に要

求される設計寿命の概念が定着していなかったためと言うことが出来るのである。例えばローマのパンテノンには2000年の時間を経過した現在でも十分にその美しさと雄姿を保っているが、設計者はこの寿命を80年と予想していたと言われている。事実、同時期にほぼ同じ材料で造られたローマの浴場は今遺跡として存在するのみである。また、ローマの街中には、ほぼ同時代に造られた城郭、アーチ橋等幾つも現存している。これらの相反する事象が語っているのは、設計寿命より長く存在する場合もあれば、設計寿命で終えた場合もあるということである。

これらの事実があつたにも拘らず、セメントコンクリートは不滅である、維持管理が不要である、との誤った解釈のもとに、多くのコンクリート構造物が建設された背景には、現代の構造物の寿命が、その材料や要素の耐久性からでなく機能性の追求から定まってきたことによるものと思われる。例えば建物であれば低層・中層棟から高層棟への建替えや、施設機能整備の拡充・充実による建替え、橋梁等にあつては巾員の拡巾、設計荷重の変更、各種の舗装でも

† 愛知工業大学 総合技術研究所(豊田市)

設計荷重の増大による舗装厚の増大等が相次ぎ、構造物の寿命が構造物自身の劣化寿命よりも短くなっていったためと思われるのである。

しかし、ここ10年～20年前から、構造物自身の劣化による寿命終焉の事例が出たり、また被害例が多く見られるようになったことから、この話題が現在世界中を席捲しているのである。本稿はこれらについて解説するものである。

2. 補修、補強とは？今何故補修なのか。

補修の用語は次のように定義されている。コンクリート構造物の機能（尚ここで言う機能とは、耐力、耐久性、使用性を指し、いわゆる構造機能に限定する）が経時的に低下したときに、建設時まで戻すこと。一方補強とは、構造物に要求される機能、この場合には、特に耐力を指す場合が多いが、この機能を建設時以上のレベルまで上げる操作を言うこととされている。道路の設計荷重増大（日本では輪荷重20tから25tに改定されたことがある）に対処するために床版の増し厚等を行う場合が対象となるが、我国では耐震補強の事例が大半であるのでここでは対象としないことにする。

さて、日本国内で今何故補修が話題になることが多いのであろうか。その理由として次の3項を挙げる事が出来る。

(i) 昭和40年代の建設ラッシュ時に構築されたコンクリート構造物が、丁度経時的に機能が低下し、維持管理としての補修が必要な時期を迎えた。以前の好景気のときであれば壊して再建設したかも知れないが、現在では成るべく長持ちさせて、有効利用するように社会の意識が変化してきた。

(ii) 上と同じ構造物であるが、建設ラッシュにおかれて、材料の確保や施工能力を上廻って工事をしたため、セメント量の確保がない、水セメント比が大きい、施工不良がある、等の品質管理、施工管理が十分でなかったために構造物の機能が大幅に低下した。

(iii) 塩害やアルカリ骨材による被害に見られるように、建設時に予測していなかった事象により構造物が被害を受けた。その他予測していた要因であっても、その被害速度が予測より大きかった。

日本コンクリート工学協会では、かなり以前からコンクリート技工、コンクリート主任技師試験を実施し、コンクリートの材料、製造、施工、設計に携わる技術者のレベルを

向上させるべく制度を確立してきた。近年、この資格制度に加えてコンクリートの補修診断士の資格認定のための制度を設け、試験を実施したところ、会場を追加する必要があるほど受験者が殺到したくらいである。このことは、いかに今日本で補修工事が、着目されているかを示す良い指標である。

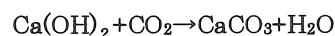
3. コンクリートの耐久性と鉄筋の腐食

コンクリートの耐久性を損う要因として挙げられているのは、①中性化 ②塩化物イオンの浸透 ③凍結融解作用 ④化学的侵食作用 ⑤アルカリ骨材反応 ⑥その他である

これらの要因については衆知のことではあるが、簡単に説明にしておきたい。

①コンクリートの中性化

中性化は炭酸化とも呼ばれているように、空気中の炭酸ガスと反応し、コンクリート中の水酸化カルシウムが炭酸カルシウムに変化する化学反応である。



コンクリートは、内部に存在する $\text{Ca}(\text{OH})_2$ の影響によりアルカリ性を呈しているが CaCO_3 に変化することによって中性化するのである。この反応がコンクリートの物性に及ぼす影響はそう大きくなく、収縮を示すこと、幾分の強度の増加、ヤング係数の増加、あるいは、多少脆弱化するようである。しかし、鉄筋コンクリートとなると、内部に埋め込まれた鉄筋は、周囲の環境が中性化することによって錆びることになる。従ってこの要因は鉄筋コンクリート構造物の寿命を低減させるのである。

②塩化物イオンの浸透

コンクリート中に塩化物イオン Cl^- が含まれると、コンクリート中の鉄筋はアルカリ性の雰囲気の下でも発錆する。発錆が始まる限界量は Cl^- として 1.2kg/m^3 といわれているが、日本のレディーミクストコンクリートでは出荷時には 0.3kg/m^3 以下に規定している。しかし海岸に近い場所に建設された構造物には、海水による塩化物イオンが浸透し、鉄筋を発錆させる。多い場合には Cl^- 量として $6\sim 8\text{kg/m}^3$ にも達していたとする報告がある。この塩化物イオンの浸透はコンクリートそのものの物性を大きく変えるものではなく、鉄筋が錆びて膨張し、その膨張によってコンクリートにひびわれを発生させ、このひびわれ

から空気、水、塩化物が更に容易に鉄筋に到達し、発錆を促進させるのである。現在日本の土木学会では、塩化物イオンの浸透速度を式で推定し、その量が構造物の耐用年数内に限界値に達しないように配合を定めることにしている。

③凍結融解作用

過酷な気象作用によりコンクリートが凍結および融解作用を受けるとコンクリートの耐久性が低下し、コンクリートの表面からスケーリングやポップアウト現象が生じたり、内部にもひび割れが発生してコンクリートの劣化が著しく進行する。この現象を凍結融解作用といい、この劣化を防止する性能が凍結融解抵抗性である。

コンクリートに微細な空気泡を連行し、気泡間隔係数を 250μ 以下に保てば、かなりの凍結融解作用に抵抗出来ることが知られている。しかし、この場合も、骨材自体も強硬で凍結融解作用に対して抵抗力のあることが必須であり、軽量骨材とか原コンクリートがAEコンクリートでないコンクリート塊から製造した再生骨材では、連行空気量を増しても抵抗性には限界があることが知られている。

④化学的侵食作用

コンクリートは、元来アルカリ性であるので、酸の作用を受けると弱い。従って酸類を扱う工場等の床材に用いるのは止めたほうがよい。その他にもコンクリート自体を劣化させる化学物質が沢山あるが、日本では火山地帯にコンクリート打設を行うことがあり、この場合には、耐久性の低下をコンクリート以外の材料で保障することが必要である。九州の火山地帯で施工されたコンクリート橋脚は良い事例である。

⑤アルカリ骨材反応

骨材、特に火成岩の中には、セメントの水和物から供給されるアルカリと反応して、これに水が供給されると膨張してコンクリートを劣化させることがある。これはアルカリ骨材反応と呼ばれ、今日、日本ではコンクリートの耐久性を低下させる要因の一つとして大きくクローズアップされている。数十年前までは、日本にはアルカリ骨材反応は認められないと言われていたが、骨材の主力が河川産から碎石に転じたこと、一時期セメント中のアルカリ成分が多かったことと相まって日本中でアルカリ骨材反応に起因するコンクリート構造物の劣化が報告された。しかし、その後は、アルカリ骨材反応に対する防止策が提案され、現在は、あまり話題を呼んではいないが、それでもまた新し

く発見されたとする意見もある。現在日本で採用しているアルカリ骨材反応抑制策とは①コンクリート 1m^3 中のアルカリ量 (R_2O に換算)を $3.0\text{kg}/\text{m}^3$ 以下に保つ ②混合セメントを用いるか、高炉スラグ微粉末、フライアッシュを必要量用いる ③無害な骨材を用いるである。従来は無害な骨材を用いることを第一とし、無害でない骨材を用いる場合には、抑制策を用いるとしていたが、昨年のJIS A 5308の改正では記述順を逆にした。それは無害な骨材が基本的に少ないことによるものである。

⑥その他

磨耗による損傷等構造物が供用される条件によって、いくつかの要因が挙げられるが、主たるものは上述の①～⑤と考えてよい。

現在日本で全国的に問題となっているのは①および②である。この①および②とその他が異なるのはコンクリートの性能は変わらずに、内部に埋め込まれた鉄筋の腐食によってコンクリート構造物の寿命が短くなることである。このことから環境条件の厳しい場合には、エポキシ樹脂塗装鉄筋の使用が認められるようになっている。

4. 補修技術の進歩

10～15年ぐらい前から劣化進行した構造物が目立ち始め、補修工事が増加し、近年では新規建設工事が停滞し、補修工事の予算が増加する傾向にある。これに伴って補修技術も格段に進歩し、最新の技術が導入されている。

① 劣化診断技術

コンクリートの変状は、ひびわれ発生から開始するので、劣化診断の基本はひびわれの発見およびそのひびわれの形状、寸法から原因推定を行ってきた。いわゆる目視による判断である。しかしこの手法では十分な経験を有するものしか判断できない、また熟練者であっても内部劣化、特に鉄筋の発錆およびその進行については全く情報が得られなかった。このようなことから、近年では赤外線、超音波、電磁波等を応用した測定機具が開発、市販されるようになってきた。ただしその精度については未だ不十分なところもあるが、例えばトンネルの変状観察が従来は目視と叩き(金づち等で叩いて、反発音で空洞を調べる)に頼っていたのが、近年では列車に測定器を取り付け、連続的にデータがとれるようになっている。

②劣化部補修技術

劣化したコンクリート構造物を補修して、性能を建設時まで戻す技術もここ数年で飛躍的に進歩している。以前は補修するにしても、劣化したコンクリートのみをはつり取り、ここに新しいコンクリートやモルタルを充填していたが、鉄筋の周辺部の全てのコンクリートをはつり取らないと再度鉄筋が腐食して表面のコンクリートを押し広げひびわれが再発することから、はつり取る部位は鉄筋の裏まですべて除去することが基本であることが理解された。そのため、ウオータジェットを用いて鉄筋を傷つけずに鉄筋の裏側のコンクリートまで除去する技術が開発されて多用されている。更に埋め戻すコンクリートも高品質のものにするとか、除塩剤を用いる方法も提案されている。更に設備は大がかりになるが、電気を用いての除塩工事、コンクリートの再アルカリ化工法が提案され、一部で実証されている。また、鉄筋の防食を防止する目的で、微量の電気を流す電気防食工法も一部で実証され、その効果が確認されている。

4. 山陽新幹線における事例

山陽新幹線は建設後約30年を経過したが、近年、橋梁からのコンクリート片の剥落、トンネル内コンクリートの剥落が相次ぎ、人命には影響はなかったものの、列車の一部破損を招いたり、駐車中の自動車の屋根部を破損する等の事故が続いた。山陽新幹線を営業するJR西日本は、旧国鉄から新幹線を引き継いだときから調査委員会を設け、調査と対策を実施していたが、事態を重くみた国土交通省は第3者から成る調査委員会を設けてその対策に当らせることにして、長瀧を調査委員会委員長に任命した。

山陽新幹線は図-1に示すように全長約600kmのうち、トンネル区間が50%、盛土区間が12%その他が橋梁並びにラーメン橋区間である。そこで委員会の対象区間は鋼桁の

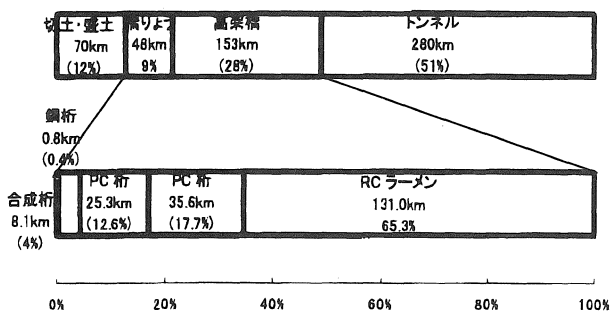


図-1 山陽新幹線の設備数量比率

部分を除く、PC桁、RC桁、およびラーメン橋区間を対象として調査を行った。解桁に際しては従来の委員会が有していた調査試験データに加え、新たに試験で得た情報も加味して追跡調査をしたのである。結果の一例を図-2に示すが、表面部には塩化物イオン量が認められないが、奥に入ると濃度が高くなり、更にそれ以上に深くなるとまた濃度が下がる傾向が見られた。

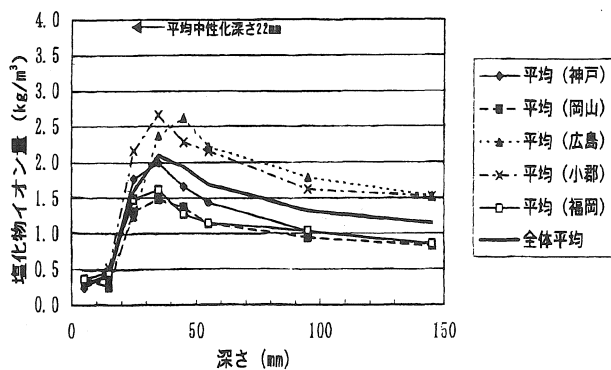


図-2 コンクリート内部の塩分量分布 (平均値)

この濃度が高くなる位置は、表面から30~40mmの位置で、ここはくしくも鉄筋が埋め込まれる深さと一致することも理解された。さてこの塩分分布から次のことが推定された。山陽新幹線においては建設時海砂を用いたコンクリートを打設したが、当時海砂の洗浄が十分でなく、そのためコンクリート中に塩化物イオンが当初から存在し、その量は構造物内部に残存する量に相当するものであったと思われる。しかし、表面から中性化が進むと塩化物イオンが内方に濃縮され、そのために中性化域と未中性化域との境界で塩化物イオン量が最大の値を示している。コンクリート表面にひびわれ、浮き等が生じた部分は第3者危害をもたらす可能性があるため、JR西日本では自らの占有地と河川部を除いて総て叩き落とししたが、この叩き落とし面積と中性化残り(鉄筋のかぶり-中性化深さ)の間には、図-3に示すように関係が認められた。また図-4には各鉄筋腐食度と叩き落とし面積の関係を示すが、或る程度の相関が見られ、叩き落とし面積は、コンクリート構造物の補修の要否を定める一つの指標となることが解った。なお、鉄筋腐食度の評価基準は日本コンクリート工学協会の提案した基準で、その説明を図-5に示す。

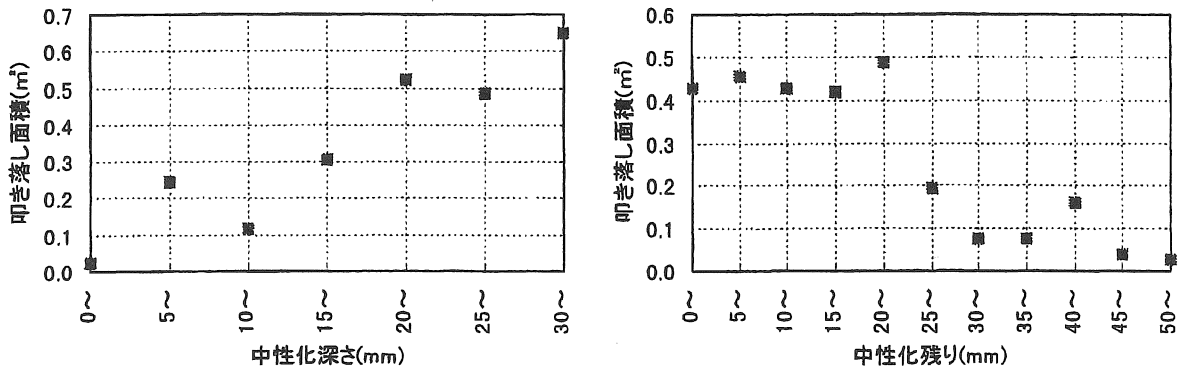


図-3 中性化深さおよび中性化残りとの叩き落とし面積

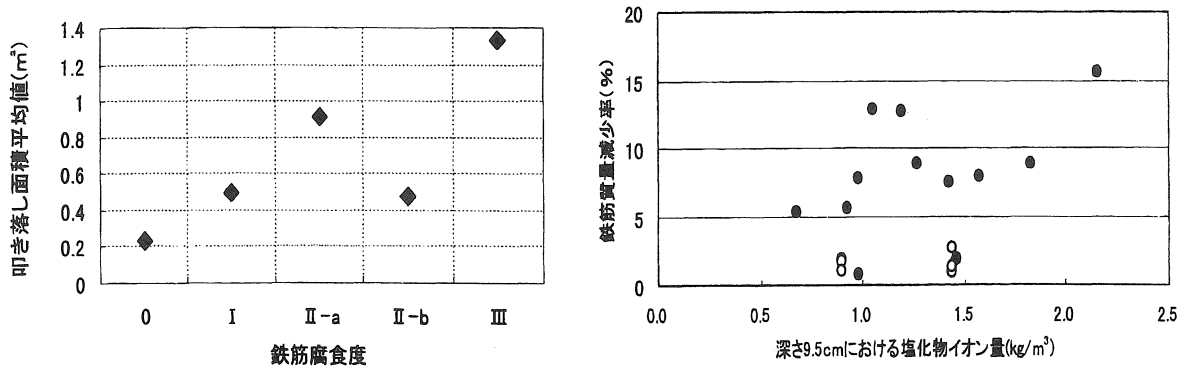


図-4 各鉄筋腐食度での叩き落とし面積

図-7 塩化物イオン量と鉄筋質量減少率の関係

腐食度	評価基準
0	施工時の状況を保ち、以降の腐食が認められない
I	部分的に軽微な腐食が認められる
II a	表面の大部分に腐食が認められる
II b	部分的に断面欠損が認められる
III	鉄筋の全周にわたり断面欠損が認められる
IV	鉄筋断面が 1/6 以上欠損している

図-5 鉄筋腐食度の評価基準

次に、はつり出した部分に埋め込まれていた鉄筋を調査して求めた鉄筋の質量減少率と中性化残りの関係を図-6、鉄筋の質量減少率と深さ 9.5cm における塩化物イオン量(建設時から内在していたと思われる量)の関係を図-7 に示す。

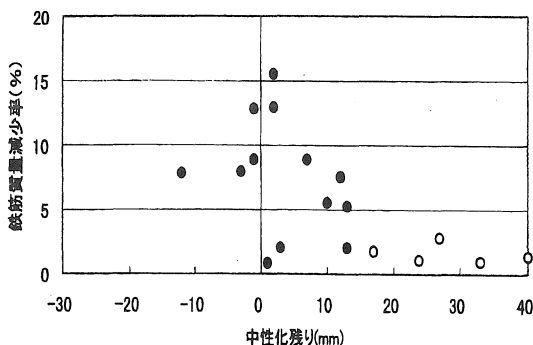


図-6 中性化残りとの鉄筋質量減少率の関係

このことから中性化残りが 15mm 以上であれば鉄筋は質量減少率はないと考えてよいこと、5~15mm は塩化物イオン量によっては危険であること、5mm 以下の場合には鉄筋をはつり出して、錆のレベルを調査する必要があることが解り、深部の塩化物イオン量に関しては 0.6kg/m^3 をしきい値にするのが良いことが理解された。これらの資料により、委員会は図-8 に示す補修工事選定のフローを提案した。また図-8 の下段に示す各種補修工事の説明および図-8 の用語の説明を図-9 に示す。現在 JR 西日本はこれらのフローに沿って、沿線の構造物を約 1 万枚(例えば 3 聖間ラーメン橋を 1 ユニットとし、これに 1 枚の調査票を作成する)の調査票に記入整理し、各ユニット毎に必要な補修工事を行っている。ただ幸いなことに、調査の結果、公称安全率が 1.2 を下回る構造部位はわずか数例であったとの報告があり現在補修工事を完全に行っておけば、山陽新幹線は今後も重要構造物としてその責務を果していけると信じている。

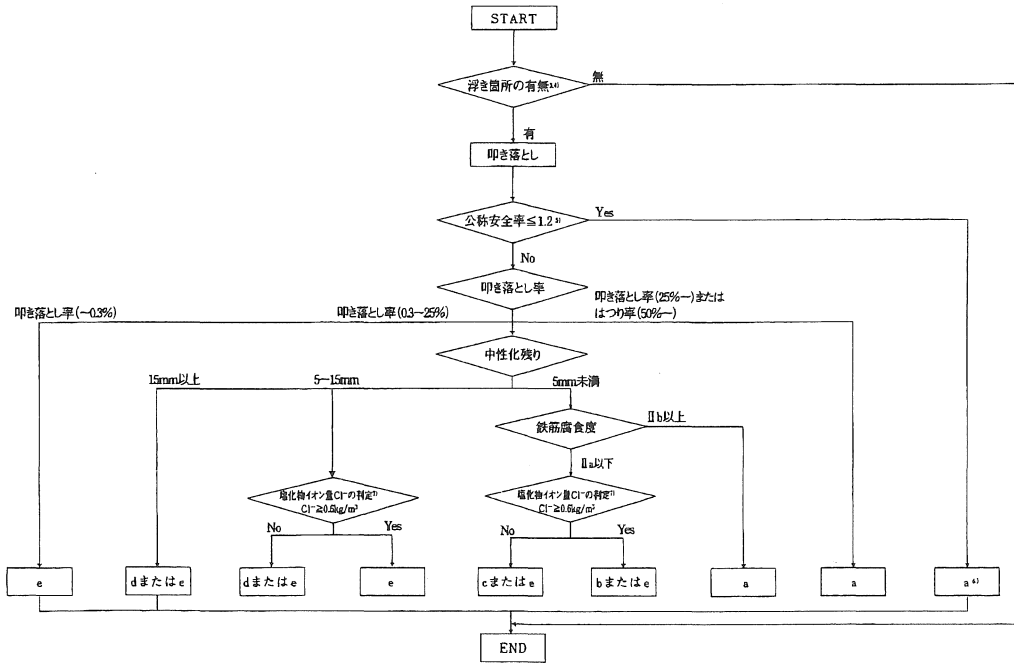


図-8 補修工法選定のフロー

6. 終わりに

吉田徳次郎先生の著書に次の文章があった。

(i)従来、土木の工事をする人間には、コンクリートその他に関する示方書は確実に実行されないのが当たり前であると考える習慣があり、従って工事請負者は示方書通りに施工しないことを予想して法外に安い値段で工事を落札し、工費の方から正当に必要な施工をすることが出来ないこと。

(ii)作業員や工事監督者が鉄筋コンクリートについて十分な知識がないために、故意でないにしても示方書に従って施工することに努力しない場合があること。

(iii)鉄筋コンクリート構造は、出来上がりさえすれば、その施工の良否はあとから容易にわからないということが、知らず知らず作業員その他の人の頭に働いて、各自の努力を省くことばかり考えるようになりやすいこと等であると思われる。

上述の文章は今から約 50 年前に述べられたものである。現在我々は、先人が、また我々自身が建設したコンクリート構造物が、吉田教授の指摘した建設時の不適合や劣化によって、損傷が著しく、その対応に苦勞している。私自身は研究者と教育者で現場の経験はないが、しかし、この時代を生きてきた土木技術者として深く反省しているところである。

これらにちなんで、今後新築する構造物にあつては、少な

	補修の特徴等	該当する工法
a	コンクリートの置換により、中性化および塩化物イオンの影響による鉄筋腐食の進行を抑制	全面断面修復工法 ^{6,9)}
b	電気化学的工法により、中性化および塩化物イオンの影響による鉄筋腐食の進行を抑制	脱塩・再アルカリ化工法、電気防食工法
c	電気化学的工法により、主に中性化による鉄筋腐食の進行を抑制	再アルカリ化工法
d	全面的に炭酸ガス、酸素、水分等の鉄筋腐食因子の侵入を抑制	全面表面処理工法
e	部分的な変状箇所の鉄筋腐食の進行を抑制	部分断面修復工法 ⁹⁾

用語	用語の説明
公称安全率	鉄筋径の測定等により推定した実耐力を設計耐力により除した値
叩き落とし率	部材面積に対して、当該点検においてハンマー等により叩き落とした面積の割合
はつり率	叩き落とした周囲を、鉄筋の腐食状況が点錆程度になるまで、電動ピック等ではつり取った面積の部材面積に対する割合。なお、はつり面積には、過去にはつり取った面積を含めた累計値を用いる
中性化残り	鉄筋のかぶりから中性化深さを引いた値

図-9 補修工法および用語の説明

くとも設計耐用年数に達するまでは、これも設計時に許容された範囲での補修工事で済むように建設するのが、技術者の務めであると考えている。

参考文献

- 1) 長瀧重義：コンクリート構造物の補修は今：リフリート通信, No.41, pp3-10, 2002
- 2) (財)鉄道技術研究所；山陽新幹線コンクリート構造物検討委員会報告書, 2000年7月
- 3) 長瀧重義, 山陽新幹線のコンクリート構造物に想う 日本鉄道施設協会誌, Vol.38, No.10, pp16-17, 2000