

コンクリート構造物の劣化とメンテナンス

東京工業大学名誉教授、工学博士

東京大学工学部土木工学科（1960 年卒）

長瀧重義

1. はじめに

コンクリート構造物の劣化、さらに、この劣化に対応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前のことである。例えば RILEM の開催である Durability of Building Materials and Components (DBMC) と題する国際会議は、3 年に 1 回の開催であるにも拘らず来年のベルギーで 14 回目の会議を予定している。また初回を日本で開催した Concrete Under Severe Conditions (CONSEC) も今年のイタリアでの開催で 8 回目になる。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 200 年、鉄筋コンクリート(160 年)、プレストレストコンクリート(130 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する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 年と予測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、暴露環境によって設計寿命より長く存在する場合もあれば、設計寿命以下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ためと思われる。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、各種の舗装でも設計荷重の増大による舗装厚の増大等が相次ぎ、性能から定まる構造物の寿命が構造物自身の劣化寿命よりも短くなつてきたためと思われるのである。

しかし、ここ 20 年～25 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挙げる操作を言うときとされている。道路の設計荷重増大（輪荷重 20 t から 25 t に改定された事例がある）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 項を挙げることが出来る。

(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、維持管理の面から補修が必要な時期を迎えた。以前の好景気のと看であれば壊して新築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、建設ラッシュにおされて、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、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、その被害レベルと速度が予測より大きかった。

日本コンクリート工学会では、かなり以前から「コンクリート技士」、「コンクリート主任技士」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「コンクリート診断士」の資格認定のための制度を設けて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。

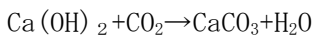
3. コンクリートの耐久性と鉄筋の腐食

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 Ca(OH)_2 の影響によりアルカリ性を保っているが 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はなく、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が、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いが、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を拡散方程式で算定し、鉄筋周辺の塩化物イオン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 $250\mu\text{m}$ 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砕石に転じたこと、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1m³中のアルカリ量(R₂Oに換算)を3.0kg/m³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、一昨年のJIS A 5308の改正では記述順を逆にした。それは現在の日本で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、いくつかの他の要因も挙げられるが、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. 劣化診断と補修技術の進歩

10～15年ぐらい前から劣化が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。これに伴って劣化診断技術や補修技術が格段に進歩し、最新の技術が導入されている。

4.1 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ている。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きている。

4.2 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、ウォーター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。