

既設コンクリート構造物の長寿命化への挑戦

丸山 久一*1

材料としてのコンクリートは、適切な骨材を用いて所定の配合設計、施工を行えば、通常環境作用の下では100年以上経っても性能の低下は少ない。しかし、コンクリート構造物とした場合、引張力を負担させるために鋼材（鉄筋、PC鋼材、型鋼など）を用いるものが多く、厳しい環境状態にある構造物では、適切な維持管理を行わないと想定どおりの寿命を達成できないことが明らかになっている。本稿では、コンクリート構造物の寿命を短くしている劣化要因について述べ、耐久性に関する技術の現状を示すとともに、現在の維持管理上の問題点を述べる。さらに、国土交通省が進めている橋梁の長寿命化修繕計画を地方自治体レベルにおいて実効あるものにするための提言を示すとともに、今後の技術開発の方向性について述べる。

キーワード：コンクリート構造物、劣化、長寿命化、維持管理

1. はじめに

昨年12月2日に発生した笹子トンネルの事故は、インフラの老朽化という観点でマスコミに大きく取り上げられ、改めてコンクリート構造物の耐久性や維持管理体制が問われることとなった。コンクリートの寿命は半永久的と思われて、1960年代後半からのわが国の高度経済成長期には数多くのコンクリート構造物が建造されてきた。環境条件や使用材料によっては、比較的早期に不具合が発生することは認められていたが、個別の問題として処理されていて、構造物一般の問題として大きく取り上げられることはなかった。ただ、1980年代になると塩害やアルカリ骨材反応による劣化が各地で認められ、監督官庁や学会等でそれらに対する検討が始められていた。

国土交通省も2007年8月2日に発生したミネアポリス市でのトラス橋の落橋事故を受けて、国内の橋梁の一斉点検を行うとともに、橋梁の長寿命化修繕計画策定事業補助制度を創設し、地方自治体が管理する橋梁にいたるまで維持管理および修繕の計画作成を促し、支援することとした。そのようななかでの笹子トンネルの事故は、国民にとって長寿命化修繕計画の内容や維持管理のあり方に一抹の不安を抱かせるものとなった。

時間の経過とともに、構造物の性能は徐々に低下していくのは自然の現象であるが、その度合いは一律ではない。一つの構造物についても、力は構造物全体に一律に作用す

るわけではないし、外的な環境因子（温度、湿度、水、腐食物質等）も同様、一定には作用しない。使用されている材料の性質も、必ずしも均一ではない。一方、管理の仕方によっては、性能の低下速度を遅らせることも可能である。したがって、構造物が所要の耐荷力を失う時期も一律に50年ということではない。個別の例をあげるなら、フランスにあるガラビ鉄道橋（鋼橋）は建造後130年経過しても、通常の列車運行がなされているし（写真-1）、小樽港の防波堤（コンクリート）は110年を超えても十分機能を果たしている^{1, 2)}。



写真-1 ガラビ鉄道橋（仏）

構造物の長寿命化を広くとらえると、まれに発生する巨大外力に対する抵抗性能も考慮する必要があるが、本稿では、環境作用に対する抵抗性という観点で述べることにする。

2. 性能の低下（劣化）

コンクリート標準示方書〔設計編〕³⁾では、構造物の耐用期間中、所定の性能を保持するよう必要な技術的照査事項を示している。材料の性能に関する経時変化についてもこれまでの知見がまとめられていて、耐用期間中に性能の



*1 Kyuichi MARUYAMA

長岡技術科学大学大学院
工学研究科 教授

低下が生じても構造物として所定の性能は維持しているように組み立てられている。また、設計当初は想定していなかった事態により、使用中に変状が認められるには、コンクリート標準示方書〔維持管理編〕⁴⁾で対応するようになっている。とはいえ、構造物や材料の性能の経時変化については、十分な知見が得られているわけではなく、これからも一層の研究の推進、技術開発が必要である。ここでは、これまでに得られている知見について概要を紹介する。なお、以降は、必要に応じて性能の低下を“劣化”と表現する。

2.1 材料の劣化

一般に、コンクリート構造物は、コンクリートと鋼材（鉄筋、PC鋼材、型鋼等）で造られている。したがって、材料の劣化としてはコンクリートおよび鋼材が対象となり、外観から分かる変状を含めて、表-1のようにまとめられる。

表-1 材料の劣化現象

コンクリート	鋼材
変色、ひび割れ、はく離・はく落、すり減り、溶解、粉砕	錆、断面欠損、破断

これらの劣化をもたらす要因は、力の直接的作用によるもの（力学的）と環境作用によるもの（物理・化学的）に分けられる。コンクリート工学分野で使用されている用語をこの分類で整理すると表-2に示すようになる³⁾。

表-2 劣化要因

	コンクリート	鋼材
力学的	疲労	疲労
物理・化学的	収縮 凍害 アルカリ骨材反応 酸による腐食 中性化・炭酸化	塩害（錆）

コンクリート構造物の診断に際しては、まず外観から劣化要因を推定することになる。表-2の中で、材料としてのコンクリートの劣化要因に塩害を加えていないのは、塩化物イオンはコンクリートそのものに大きな影響を及ぼすことはないからで、問題は、塩化物イオンの浸透により、コンクリート内部の鋼材が発錆することである。

コンクリート構造物の劣化診断を難しくしているのは、同じ外観上の変状でありながら、劣化要因が異なっている場合があることである。たとえば、“ひび割れ”は、コンクリートの劣化要因である「疲労」、「収縮」、「アルカリ骨材反応」、「凍害」では、必ず最初に現れる事象である。塩害は主として鋼材が錆びることであるが、コンクリート中の鋼材が錆びると体積膨張を生じて、コンクリートにひび割れを発生させる。このような場合には、劣化要因を特定するためにさらに調査、検討が必要となる。個々については、コンクリート標準示方書〔維持管理編〕⁴⁾等を参考にするとよい。

2.2 構造物の劣化

構造物を構成している材料が、部分的に劣化していても、必ずしも構造物としての性能や機能が要求を満たさなくなるわけではない。性能として“安全性”を考えた場合、構造物に求められるのは、所定の荷重の下で耐荷性能（曲げ耐力、せん断耐力、ねじり耐力）を有していることであり、床版の陥没や高欄コンクリートの落下等に代表される第三者被害を生じないことである³⁾。所定の荷重が作用しても、構造物の各部位に発生する断面力や応力は一様ではないので、断面力や応力が小さい部位での多少の材料劣化は、構造物としての耐荷性能に直接影響を及ぼさない。

一般に、コンクリート構造物の設計においては、終局限界状態として曲げ破壊になるよう部材断面や鋼材（鉄筋、PC鋼材、型鋼など）量等を決定する。この場合、耐荷性能を支配するのは主として鋼材量（鋼材の断面積）である。したがって、構造物の劣化を診断する場合、どの位置で鋼材の劣化（断面欠損）がどの程度発生しているかが重要な指標となる。

3. 長寿命化

塩害や酸によるコンクリート構造物の著しい劣化が見られていることから、すべてのコンクリート構造物が一様に劣化していくと思われていて、更新も含め、維持管理費が膨大になると喧伝されている。

翻って、コンクリートあるいはコンクリート構造物はそのもそもどの程度の寿命があるものであろうか。土木学会では、2009年に古代ローマコンクリートに関する調査報告書をまとめている⁵⁾。2000年ほど前のコンクリート塊を入手する機会があり、コアの圧縮強度を調べるとともに、セメントの成分分析から、当時のセメントを再現し、モルタル供試体ではあるが、初期強度の推定を行っている。このコンクリートは、火砕流に埋まっていたこともあるが、2000年を経ても初期強度の1/4～1/5程度は有していると推定されている。小樽港の防波堤については、長期にわたるコンクリートの強度試験結果が残されていて、100年を超えても材齢28日強度に近い強度は保持していることが明らかになっている（図-1）^{1, 2)}。

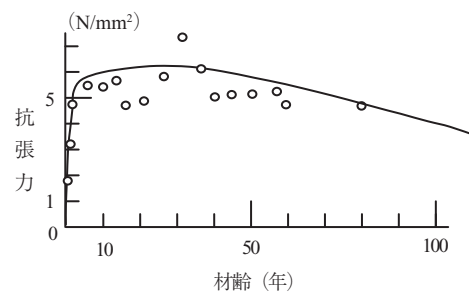


図-1 コンクリート強度の経時劣化

このことから、水、セメント、骨材からなる材料としてのコンクリートは、わが国の通常的环境下では、100年程度の期間で強度に関する経時劣化はほとんど考慮しなくて

○ 特集 / 解説 ○

よいと考えられる。実際、小樽港の防波堤以外でも、80年を超えて通常に供用されているコンクリート橋梁構造物はいくつもある。

しかし、東北、北陸、山陰など日本海に面している地域では、冬季の季節風により、日本海からの多量な飛来塩分がコンクリートに浸透し、鉄筋腐食を生じさせていて大きな問題となっている。同地域の山間部では、凍結防止剤による塩害も発生している。コンクリート中の鋼材（鉄筋、PC鋼材、型鋼など）表面においては、何らかの電位のアンバランスが生じている。侵入した塩化物イオンの量が多くなると、電位のアンバランスが増幅され、腐食電池が形成されて鋼材が錆び始める。プレテンション桁のように、1本あたりのPC鋼材の断面積が小さい場合には、桁全体としてPC鋼材の断面欠損の進行度が速い。日本海沿岸で汀線から500m以内に設置されたもので、とくに塩害対策を施していない場合には、建設後40年程度で架け替えられているものもある（写真 - 2）⁶⁾。



写真 - 2 塩害を受けた PC 桁

コンクリート構造物の劣化要因として塩害を考えた場合、錆汁や腐食ひび割れを発見した段階で、塩化物イオンは相当量がコンクリート中に浸透している。電位のアンバランスは一樣ではないので、必ずしも鋼材全体が腐食しているとはかぎらないが、鋼材の腐食箇所のみ断面修復等の手当てをしても、電位のアンバランスは解消されず、数年経つと、また再劣化が生じる。これを防ぐには、腐食電池の形成を阻止する電気防食のみが、現状維持を可能としていることが実構造物でも確認されている。

図 - 2 は、参考図書⁷⁾に示されている濃淡電池の例と電気防食の原理である。濃度の異なる硫酸銅溶液（CuSO₄）

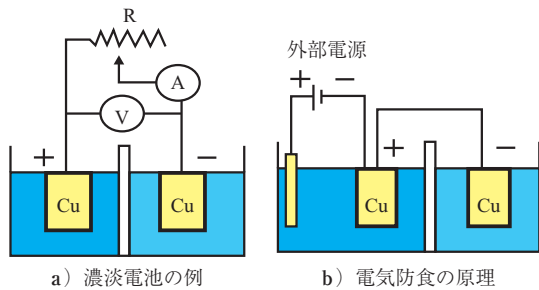


図 - 2 腐食電池と電気防食の原理

中に銅板を入れると、銅板での電位が異なってくる。この銅板を結線すると、電位が卑の銅板から電位が貴の銅板に向かって電子が移動する。これが腐食電流を発生させるメカニズムで、これを抑制するには、外部電源等を用いて、電位の貴のレベルを卑に近づけることが必要で、電気防食工法はこの原理を用いている。

塩害の厳しい北陸地方で長年対策を検討し、実施してきた結果から判断すると、塩害による鋼材腐食は電気化学的な原因で生じているので、鋼材腐食を抑制するには、電気防食の原理に従うしかない。構造物および部材の耐荷性能という観点から経時劣化を模式的に表現すると図 - 3 のようである¹⁾。

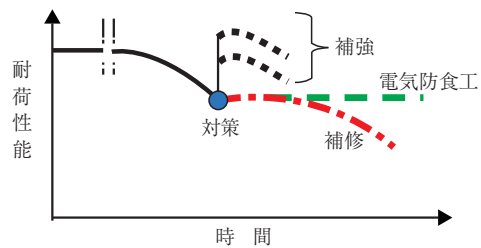


図 - 3 構造物の耐荷性能の経時劣化

4. 維持管理

橋梁構造物の長寿命化修繕計画策定により、地方自治体が管理している橋梁構造物に至るまで、今後の維持管理の方策が定められることになった。ただ、一時的に国の補助により管理している橋梁構造物の実態把握ができたものの、具体的な維持管理を経常的にできるかという、課題は残されたままである。それは、これまでなぜ具体的な維持管理ができなかったかという問題が依然として解決されていないからである。

図 - 4 に新潟県内で調査した結果の一例を示す。どの自治体も維持管理課はあるが、専門職員がいない自治体が半数近くある。さらに、専門職員がいるとしても、技術系の職員とはかぎらない。加えて、経常予算は維持管理にほとんど回されていないので、今回のように国の補助がある場合には、一時的に予算の組替えをして計画策定を行ったが、この規模の経費を経常的に確保することはほとんど不可能である。

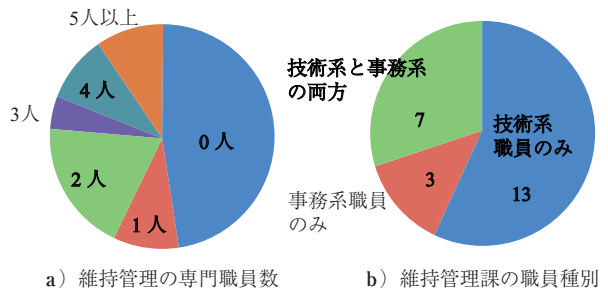


図 - 4 新潟県内でのアンケート結果

この状況を打開するために、筆者を含めた研究グループ

では、地域医療のネットワークシステムに準じた維持管理システムを提案し、その実現に向けた活動を行っている(図-5)。新潟県内の地域医療は、新潟大学医学部および附属病院を中心として、市民病院、開業医(ホームドクター)のネットワークを構築し、医師の育成、輩出および先端医療に関する情報の発信を行っている。人々は、通常はホームドクターに診てもらっているが、精密検査や高度な医療技術が必要な場合には市民病院に行き、そこでも手に負えない場合には新潟大学の附属病院に行っている。



図-5 ネットワークシステム

地方自治体における構造物の維持管理においては、ホームドクターに匹敵する技術者が圧倒的に不足している。比較的規模の大きな橋梁構造物の維持管理については、市民病院に相当するコンサルタンツの技術者が対応しているが、技術者の数はかぎられているので、経費的な面を除いても、実際に診断を行い、補修・補強を施せる橋梁数はかぎられている。そこで、上記の研究グループでは、図-6に示すような比較的簡易にコンクリート構造物の一時診断ができるツールを開発するとともに、それをを用いて診断業務のできる技術者の育成を試みている⁸⁾。実際に、このツールを用いて、長寿命化修繕計画の策定が終わっている自治体の全橋梁構造物(163橋)の診断を行ったところ、ほとんど同様な診断結果をほぼ1/10の時間で達成することができている。ここでの診断の目的は、経時劣化の進行がないことを確認するもので、経費的に10年に1回しかできない診断を毎年行うことにある。



図-6 開発した簡易な点検システム

5. おわりに

材料としてのコンクリートおよびコンクリート構造物の

力学的特性に関する知見に比べて、耐久性あるいは経時劣化という観点での知見は、体系づけられたものが非常に少ない。研究という面から考えても、力学的特性については比較的短い時間で実験が可能で、理論的扱いも確立されている。一方、コンクリート構造物の耐久性あるいは性能の経時劣化を調べようとする、実物については数十年の時間が必要となるし、実験的に行うとしても、時間を短縮する促進試験の有効性を確認するためには、相当の時間を必要とする。コンクリート構造物が設置されている実環境では、複数の影響因子が相互に影響しながら、しかも変化している。たとえば、飛来塩分が問題となる環境においては、塩分が飛来する時期と量、温度や湿度の日変化や年変化、さらには、コンクリートのひび割れの有無、局所的な品質のばらつき等を総合的に評価しないと、コンクリート中への塩化物イオンの浸透を適切に評価できず、鉄筋の腐食については、鉄筋周囲の電気的アンバランスを定量的に評価しなければ、腐食速度を適切に評価できない。現在は、実構造物において塩化物イオンの濃度分布の測定や鉄筋の発錆の有無の検証から、マクロ的に評価式を作成している段階なので、適用性の範囲が広くなく、精度的にもまだまだ研究の余地が大きい。

近年では、コンクリート内部で生じている化学的な現象や、物質移動等をミクロ的観点から物理・化学的に明らかにする研究もなされ始めていて、耐久性や経時劣化というマクロ的な現象をより一般的に解明することが試みられている⁹⁾。コンクリートの経時劣化のメカニズムがより詳細に把握できれば、コンクリート構造物の設計、施工、維持管理において、長寿命化を図るより有効な対策が可能となる。そこに至るために、現段階では、実構造物の観察をよりよく行う維持管理システムを構築し、必要なデータの継続的取得を確保することが肝要である。

参考文献

- 1) 丸山久一：インフラ整備における構造物の高耐久化・長寿命化について、プレストレストコンクリート, vol.52, No.2, pp.34-37, 2010, MAR-APR
- 2) 長瀧重義 監修：コンクリートの長期耐久性 -小樽港百年耐久性試験に学ぶ-, 技報堂出版, 1995
- 3) 土木学会：2012年制定 コンクリート標準示方書, 設計編, 2012
- 4) 土木学会：2013年制定 コンクリート標準示方書, 維持管理編, 2013
- 5) 土木学会：コンクリートライブラリー 131, 古代ローマコンクリート, 2009
- 6) 村上祐貴, 内山拓也, 井林 康, 田中泰司：塩害により損傷を受けた実橋プレテンション PC 桁の耐荷性状, コンクリート工学年次論文集, Vol.33, No.1, pp.839-844, 2011
- 7) H.H.Uhliq, R.W.Revi 共著, 松田精吾, 松島 巖共訳：腐食反応とその制御, 産業図書 (1989), pp.20-22
- 8) 赤原健太, 井林 康, 陽田 修, 田中泰司：タブレット端末を用いた橋梁の概略点検手法および入力システムの開発, 第67回土木学会全国大会年次学術講演会, VI-127, 2012.9.
- 9) http://concrete.t.u-tokyo.ac.jp/jisedai_ishida/jpn/introduction/index.html

[2013年9月8日受付]