

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

丸山 久一*

わが国の高度経済成長期に数多く建設されたインフラストラクチャーが築後 50 年を迎えつつあり、維持管理費の増大が懸念されている。過去 15 年における国の公共事業費の縮減状況をふまえて、早急に検討が必要な維持管理上の課題として、劣化したコンクリート構造物の耐荷性能およびその経時変化に関する評価方法の確立の重要性を指摘した。さらに、築後 79 年間塩害環境下にあった実コンクリート橋梁について、その一部を切り出した試験体の実験結果およびその解析結果から、鋼材の腐食状況を適切に把握すれば耐荷性能が精度よく評価できることを示した。これらの結果から、供用期間を具体的に定めることで、より合理的で経済的な維持管理が可能になることを述べた。

キーワード：コンクリート構造物、公共事業費、長寿命化、性能の経時劣化、載荷試験、耐荷性能の解析

1. 歴史に学ぶ

コンクリートの歴史は古い。紀元前後にはすでに使用されていたようである¹⁾。鉄の歴史はもっと古く、紀元前 1000 年頃には、すでに人の手によって製造されていたといわれている²⁾。ところが、コンクリートと鉄を組み合わせた鉄筋コンクリートの歴史は、まだ 200 年にも満たない。1850 年に J.L.Lambot (仏) が厚さ 36 mm の鉄網入り小船を建造し、1867 年には Joseph Monier (仏) が鉄網を芯としてセメントモルタルで植木鉢を製造したとのことである³⁾。

本格的な鉄筋コンクリート構造物は 1875 年頃から欧米で開発がなされ、鉄筋コンクリートの理論 (曲げ、せん断) も展開されはじめた。コンクリートにひび割れが生じることは当初から認識されていて、ひび割れ防止のため、鉄筋を引っ張る試みもなされている。ただし、プレストレストコンクリート構造物としては、高張力鋼が開発された後の E.Freyssinet (仏、1928 年に特許取得) から始まる³⁾。

技術開発においては、ものを造る設備、造られたものの性能を確認する実験設備、さらには、性能の再現性を担保する解析技術が必須で、それらの進歩が共鳴するときに革新的な技術が生まれる。鉄筋コンクリート (プレストレストコンクリートも含む) のこの 150 年間は、新しい構造物を安全にかつ迅速に造る技術を大いに高めてきた時代であった。その一方で、コンクリートの耐久性は半永久的という観念が強かったためか、造られた構造物がいつまで使用

できるかについては、十分な考慮がなされてこなかった。

わが国でコンクリート構造物の劣化が顕在化したのは 1980 年代になってからである。海岸に設置された栈橋、海岸沿いを走る道路橋、異常膨張による壁体や床版のひび割れ等、塩害あるいはアルカリ骨材反応による劣化が報告されはじめ、対策方法がいろいろ試みられた。以来 30 年、補修技術、予防技術、試験方法、メカニズムの推定、解析方法等、多方面にわたり技術開発がなされてきたが、実構造物の劣化を制御するという観点からは、まだまだ前途はほど遠い。コンクリート構造物の劣化が明らかになるのに長い時間を要すること、実環境における影響因子が多岐にわたり、かつ相互に影響し合うためである。確かに、2000 年を超えて存在しているコンクリートも見つかっているが、われわれが知っている鉄筋コンクリート構造物の歴史はまだ 150 年程度である。

2. インフラ整備を取り巻く環境

道路網が拡大し、橋梁構造物の数が増加するに従い、維持管理する経費も増大する。図 - 1 に国土交通省が整理した架設年ごとの橋梁数を示す⁴⁾。とくに構造物の劣化が顕著になりはじめた 1990 年代後半からは、わが国の経済状況



* Kyuichi MARUYAMA

長岡技術科大学 環境・建設系

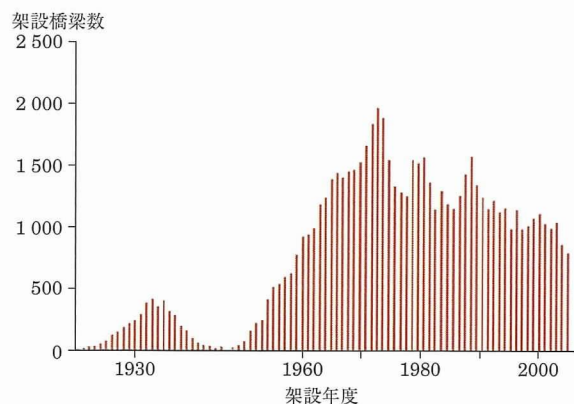


図 - 1 架設橋梁数

が停滞していたこともあって、今後の維持管理費の増大に対する懸念が拡大した⁵⁾。これまで半永久的と信じていたコンクリート構造物にも寿命があり、明日にも崩壊しそうだとの一種の強迫観念に囚われたようにも思える。

コンクリート標準示方書をはじめとして、どの示方書にも設計時には耐用年数を想定すべきことが明記されている。具体的な数字は発注者が決めることになっているが、科学的根拠に基づくというよりは、減価償却等の観点から45年とか60年とかを漠然と想定しているに過ぎない。橋梁構造物においては、10年ぐらい前から、100年間使用できる橋梁を目指そうという声があがっている。

図-2に過去16年間の国の予算と公共事業費を示す⁶⁾。1994年には15%を超える割合であったが、2009年では額、割合ともその半分近くに落ちている。予算の中で公共事業費の割合がどの程度が適正であるかについては、種々議論がある。公共事業は、国民の社会生活を支えるインフラを整備するだけでなく、災害時における復旧等の事業、あるいは不況時の経済状況を好転させるための有効需要を生み出す役割も有しているため、つねに一定の費用割当てが定めにくい側面もある⁷⁾。

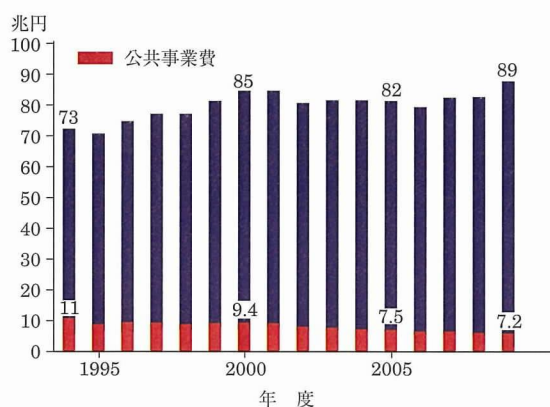


図-2 わが国の予算と公共事業費

インフラに対する要求は、時代とともに変わってくる。道路にしる鉄道にしる、100年程度のスパンで見ると、役割を終えて廃棄されるものもあり、また、新たな装いで登場してくるものもある。都市のあり様にしても、中心市街地は固定しているわけではない。人々の生活を支えるインフラはつねに整備が必要である。とはいっても、近年のわが国の経済状況、予算状況からは、所要の期間(100年間程度)大過なく使えるインフラが強求められる^{8, 9)}。

3. 長寿命化における課題

構造物がどのように劣化していくのかについて、十分な知識がなく、定量的に扱える技術は非常に少ない。現存している構造物について種々の調査がなされているが、50年以上経過したものについては、建設当初の資料が残っているケースはまれである。したがって、物性の経時劣化等を定量的に調べることは非常に難しい。そのまれなケースが、小樽港の岸壁に残されている。廣井 勇博士が、後生を思

い、100年にわたって経過観察ができるように供試体を残してくれていたのである¹⁰⁾。その結果によると、図-3に示すように、コンクリートの強度は材齢30年ほどまでは増加し続ける。その後、コンクリートは徐々に劣化しはじめ、強度が低下する。材齢80年ほどで、28日強度に近くなる。

小樽港の岸壁コンクリートはほぼ100年を経過していても十分使用できている。このことから、適切な配合設計と施工がなされたコンクリートは、かなり厳しい環境下でも100年程度は十分供用できる耐久性を有しているといえる。一方、およそ150年前に開発された鉄筋コンクリートは、本格的な橋梁構造物に適用されはじめたのが100年程前ということもあって、まだ100年を超えて使用され続けている例はない。

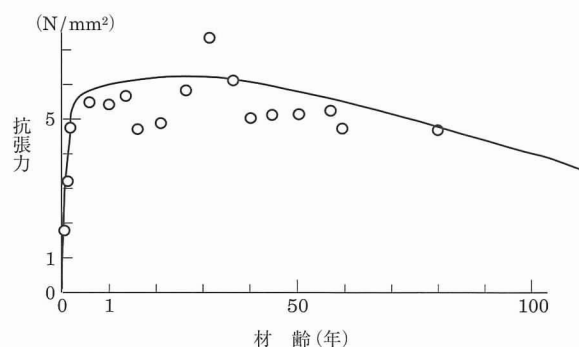


図-3 コンクリート強度の経時変化

わが国のコンクリート構造物の耐久性で大きな問題となっているのは、塩化物イオンの浸透による塩害、アルカリ骨材反応によるひび割れである。ほかに、寒冷地における凍害、下水管等の化学的腐食、床版の疲労損傷等もあげられる。これらの問題に対処するために、土木学会では2001年にそれまでの調査研究成果をとりまとめて、コンクリート標準示方書維持管理編を出版した(その後、2007年に改訂)¹¹⁾。

この維持管理編では、設計・施工段階から構造物のライフタイムを考えて、統一的な維持管理手法を提案するとともに、これまで開発されている技術を基に劣化の種別ごとに具体的な補修・補強方法を提示している点が独創的であり、他の諸基準類の基本となっている。ただ、全般的には概念的な記述が多く、具体的な評価方法に関する記述が少ない。これは、現在の技術レベルを反映しているものであって、今後は、とくに、①対象構造物の劣化度の評価方法(とくに、現存耐荷力の評価方法)、②時間経過に伴う劣化の進展(劣化曲線)、③補修・補強した後の劣化の進行、についてより定量的な評価方法の確立が求められる。

前述の図-1, 2に示されるように、これまで建設してきた橋梁で架設後50年を経る橋梁数が増え、維持管理費も急増しはじめていることと、国の公共事業に対する予算が非常に厳しくなっていることから、国土交通省では、2008年から3カ年程度で国内の橋梁構造物の長寿命化を図る基本方針を策定することとした¹²⁾。県や市町村にもその旨の通達を出している。予算が逼迫してきている状況は県および

市町村も同様で、効率的な維持管理計画は必須である。問題は、コンクリート標準示方書でも概念的にしか記述できていない上記①～③の事項を、かなり強引に定量化しようとしていることである。勿論、具体的な維持管理計画を策定するためには、補修・補強の有効性を定量化する必要があるが、技術の現状からすると、多分に恣意的になる危険性が高い。

2つ目の問題は、誰が具体的に維持管理計画を実施していくかの詳細が決められていないことである。新潟県を例にとると、県が管理すべき橋梁は4000橋を超え、市町村の管理になるものは径間長が短い橋梁が多いとは言え、数万橋に上る。早急に実行可能なプログラムを策定しないと、画餅に終わる。

4. 今後の方向

われわれが直面している課題は、現存している構造物をどのようにより長寿命化できるかという点と、これから建造する構造物をどうしたらより高耐久性のあるものにできるかである。両課題に対する技術開発という点では共通する事項も多い。既存の構造物から学び、その結果を実構造物に反映するということが必須であるが、環境条件が多様であること、結果を得るまでに時間がかかることは覚悟しなければならない。

4.1 既存構造物の長寿命化に向けて

これまでもコンクリート構造物の耐久性向上技術は数多く開発され、実際にも適用されている。ただ、それらが長寿命化のためにどの程度有効であるかということが定量的にまとめられていない。このことは、そもそもコンクリート構造物が時間経過とともにどのように性能を低下させていくかということの本質的な理解が得られておらず、定量的なアプローチができていないことに原因がある。

図-4は、維持管理においてはつねに示される劣化曲線である。縦軸の性能として、実構造物の維持管理を担当している関係者にとってもっとも必要なものは耐力である。通行止めをすべきか、特別な支保工が必要か等の判断は、現時点の耐力がいくらあるかにかかっている。

筆者の研究室で、昨年、実橋梁から切り出したRC桁の載荷実験をする機会があった。この橋梁は、築後78年間日本海からの飛来塩分にさらされ続けたものである(写真-1, 2)。築後30年した頃から損傷が目立ちはじめ、補修が施されていたようであるが、国道の路線変更に伴い、築後45



写真-1 塩害により損傷を生じた橋梁



写真-2 切り出した試験体

年目に当該町に移管替えとなった。損傷の激化とともに、重量制限が4tから2tとなり、築後76年の2006年には供用中止、2009年に解体撤去となった。

載荷試験に先立ち、コンクリートのコア強度、浸透した塩化物イオン量の分布、軸方向鉄筋の自然電位・分極抵抗の測定を行い、桁全体にわたって軸方向鉄筋の断面欠損量を計測した。とく、耐荷性能の予測という観点から、軸方向鉄筋の断面欠損量等をモデル化して、非線形解析プログラム(ATENA)により事前解析を行った(図-5, 6)。この桁はもともと曲げ性状が卓越するものであり、軸方向鉄筋の断面欠損量を桁全体にわたり精度よく計測できたこともあって、解析結果は実験結果を適切に予測することができている(図-6)。

次の段階としては、実構造物において鉄筋の断面欠損量を適切に推定できる手法の開発が望まれる。断面修復が必要な場合には、実際にかぶりコンクリートをはつて測定することは可能であるが、外観からの目視観察や非破壊検査で予測が可能になれば、より望ましい。

第3段階としては、鉄筋の断面欠損量の経時変化に関する予測手法の開発が望まれる。実構造物では、影響因子が多岐にわたり、しかも各因子は季節変動することから、一貫性のある指標を得るためには、物理・化学的な基礎研究の蓄積が求められる。同時に、実構造物においても、5年

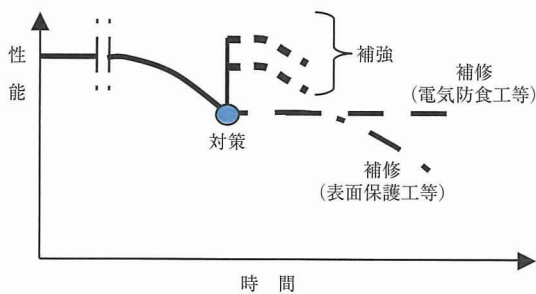


図-4 性能の経時劣化曲線

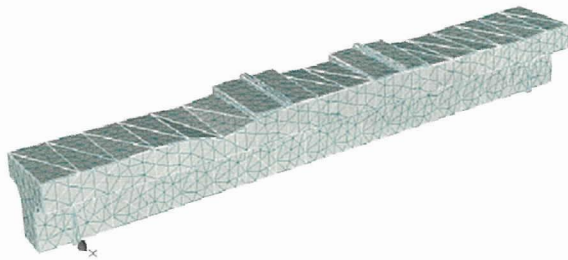


図-5 試験体のモデル化 (ATENA 3 D)

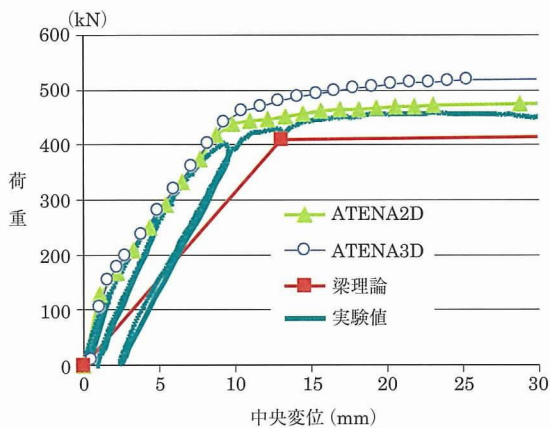


図-6 荷重変位曲線

あるいは10年の時間間隔で鉄筋の断面欠損量の変化を継続的に測定する体制を構築し、維持管理に活かすとともに、技術開発の基礎的データとして蓄積していくことが望まれる。

補修・補強技術の有効性を定量的に把握するためには、実構造物に適用した後の追跡調査が必須である。塩害対策を例にとれば、有効性の尺度は鉄筋の保護機能である。対策後の経過年数と鉄筋の断面欠損量の増加量が具体的な指標となる。

全体的な維持管理計画においては、対策を施す時点からどの程度の期間供用するかという視点が非常に重要である。供用年数を設定することで、必要な対策方法を具体的に定めることが可能となる。10年後に架替を想定しているならば、場合によっては補修・補強をしないという選択肢もあって、経費を構造物の新設にあてることもできる。

4.2 新設構造物の高耐久化に向けて

コンクリート構造物の耐荷力の低下は、究極のところ、材料の劣化による。圧縮力を受けもつコンクリート、引張力を受けもつ鋼材が劣化すれば、その程度に応じて、構造物の耐荷力の低下を招く。

コンクリートの劣化としては、それ自身の収縮によるひび割れ、アルカリ骨材反応によるひび割れ、凍結融解作用によるスケール、化学的腐食による分解等があげられるが、構造物の耐荷力に及ぼす直接的な影響は、実はそれほど大きくない。劣化しても補修で十分対応できることも多いし、計画や設計段階から対応可能なことも多い。コンクリートのひび割れは、鋼材の保護機能の低下、腐食促進

に大きな影響を及ぼす。

それに対して、鋼材の劣化、とくに腐食による断面欠損あるいは破断は、直接的に構造物の耐荷力の低下を招く。一般には、鋼材の腐食を防止することが構造物の高耐久化に繋がる。樹脂等による鋼材の保護あるいは電気防食工法による腐食抑制が効果的であるが、環境条件によっては、無対策で70年以上供用し続けている構造物もある⁴⁾。供用年数を設定し、適切な経費の下で維持管理を行うことは十分可能である。

5. おわりに

筆者が教職に就いたばかりの頃、鋼構造学の大家から“コンクリートはまだ研究することがあるの”といわれたことがある。コンクリートの科学・技術の全体が分かっていない若輩にとって、多少出鼻を挫かれた感じもあった。その後、塩害やアルカリ骨材反応による劣化が問題となり、また、阪神大震災による耐震性能が問題となって、“まだまだやるべきことが多い”と実感した。

実験設備や数値解析技術の進歩で、コンクリート構造物の力学的な性能およびその評価方法はかなり目途がついてきたと思われるが、その性能の時間経過に伴う変化(劣化)については定量的な評価ができるまでに至っていない。劣化のメカニズムに関する科学的な基礎研究が必要だと思われる。

17世紀にニュートンが万有引力の法則を発見した際、それまで停滞気味だった物理学の世界が新たな道標を得て大きく発展したとのことである¹³⁾。長寿命化・高耐久性に関する研究がコンクリートの世界に新たな展開をもたらすことを大きく期待する。

参考文献

- 1) 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
- 2) <http://ww8.tiki.ne.jp/kurogane/newpage1rekishi.html>
- 3) 田村浩一・近藤時夫：コンクリートの歴史, 山海堂, 1984
- 4) 国土技術政策総合研究所資料, 平成19年度道路構造物に関する基本データ集
- 5) 日経コンストラクション, 2004年7月23日号, 特集「負担増す維持管理」への対処策
- 6) 例えば, <http://www.mof.go.jp/seifuan21/yosan.htm>
- 7) 吉川 洋：いまこそ、ケインズとシュンペーターに学べ, ダイアモンド社, 2009
- 8) 深澤淳志：高齢化する我が国の橋梁の長寿命化に向けて, 橋梁と基礎, Vol.42, pp.14-16, 2008
- 9) 玉越隆史：道路橋の点検体系, 橋梁と基礎, Vol.42, pp.99-102, 2008
- 10) 長瀬重義監修：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
- 11) 土木学会：2007年制定 コンクリート標準示方書, 維持管理編, 2009
- 12) 国土交通白書
<http://www.mlit.go.jp/hakusyo/mlit/h20/hakusho/h21/index.html>
- 13) 松井孝典：宇宙誌, 岩波現代文庫, 岩波書店, 2009

【2010年1月12日受付】