

我が国におけるコンクリート構造物の耐久性評価小史

宮 川 豊 章*

1. コンクリートへの誤解

コンクリート構造は基本的には“丈夫で美しく長持ち”する構造形式であり、現実にもそのような構造物は多く見られる。そのため、適切な仕様を守れば、耐久性に富み、劣化はほとんど生じず、半永久的に問題は生じないと考えられがちであった。メンテナンスフリーという誤解はその延長線上にあったのであろう。

そのためもあってか、コンクリート構造の耐久性については、耐荷性と比べて、研究者あるいは技術者にとって定量的な評価対象としての魅力は小さなものになりがちであった。したがって、過去においては耐久性評価という言葉あるいは概念そのものが一般的ではなかったと言ってよいように思う。

しかし現実には、現在9割を越す自治体がコンクリート構造物に代表される社会資本の更新・維持管理に悩み、7割以上でストックの更新・維持管理が財政上の課題となっている¹⁾。コンクリート構造物であっても、時とともに劣化は生じ、適切な診断および対策が必要となるのである。現在ストックマネジメントの必要性がいろいろな場面で語られているのは、このためである。

私自身の記憶をたどれば、研究の中心的なテーマとして耐久性特に塩害を選んだ時点で、同様のテーマを選んでいる研究者は、特に土木では極めて少なかった。そのような土木コンクリート構造物であっても、仕様が不幸にも守られてはいなかったような場合がある。また、現実の仕様そのものには当然何らかの不備、限界がある。科学技術は必ず時代の制約を受け、常に完璧なものではありえないためである。

本文では、私自身が体験した土木分野を中心として、コンクリート構造物の耐久性評価の移り変わりを私的に振り返ってみたい。

2. 耐久性と評価

さて、「耐久性」とは何だろうか？ 現在土木学会のコンクリート標準示方書によれば、“想定される作用のもとで、構造物中の材料の劣化により生じる性能の経時的な低下に対して構造物が有する抵抗性”と用語が定義されている。日本建築学会の建築工事標準仕様書 JASS 5

には、用語としては示されていないが、「2.4 耐久性」の解説には、“従来は「劣化作用に対する抵抗性」という材料固有の性能として位置付けられてきたが、昨今は「劣化作用の環境下において建築物または部材が要求性能を維持存続できる能力」という広義の概念で捉えられるようになってきている”と記述されている。土木学会の定義も内容的には日本建築学会の広義に近い。

これに対し、私が社会人になった頃、35年ほど前では、土木学会標準示方書には定義はなく、次いで、“品質の経時劣化が小さく、所要の供用期間中要求される性能の水準を持続する度合い”，さらに“品質の経時劣化が小さく、所要の供用期間中要求される性能の水準を持続しうる性能特性”と改訂され現在に至っている。耐久性というものが設計の表面にあまり出てこない時代から、性能に注目する耐久性の時代への変遷を読み取ることができさう。

35年ほど以前にコンクリート研究者・技術者によって取り扱われた主たる劣化機構は、土木学会の場合凍害（写真-1）が中心であり、建築学会の場合にはこれに中性化（写真-2）が加わっていた。加えて、両学会とも海洋コンクリートで塩害が取り扱われていた。アルカリシリカ反応については、特殊な地域の問題と考えられほとんど注目されてはいなかった。

1975年のセメント技術大会²⁾では、凍害が相当数発表され、腐食に関する発表が少し見られる。土木学会年次大会³⁾でも同様である。これに対し、1979年の最初の



写真-1 凍害の例

* みやがわ・とよあき／京都大学大学院 工学研究科 教授（正会員）



写真-2 中性化の例



写真-3 塩害の例

表-1 耐久性関連用語のコンクリート工学誌特集号での初出

発行年	巻・号	特集号名
1974	12・10	海砂とコンクリート
1976	14・12	コンクリート構造物の補修・補強
1977	15・9	コンクリート構造物の耐久性
1981	19・3	コンクリート構造物における鋼材の腐食と防食
	11	コンクリートの微視的構造と諸性質
1984	22・1	コンクリート構造物の寿命をどう考えるか
1986	24・11	アルカリ骨材反応
1987	25・11	鉄筋コンクリート構造物の塩害劣化
1988	26・7	コンクリート構造物の耐久性診断
	11	コンクリート構造物の耐久性設計
1989	27・3	コンクリートの非破壊検査
1998	36・7	コンクリート構造物のリハビリテーション
2003	41・9	コンクリートの表面仕上げ・表面保護

JCI 年次学術講演会⁴⁾では、〔劣化・その他〕のセッションで凍害、塩害および耐薬品性が報告されている他、他のセッションではアルカリシリカ反応も一件報告されている。しかし、いずれにしても、現在の耐久性の定義を思わせる“評価”という観点からのアプローチはあまり見られない。

コンクリート工学の特集号の特集名⁵⁾で、耐久性という言葉が含まれているものは、表-1に示すように1977年が最初のものである。腐食については1981年、寿命は1984年、アルカリ骨材反応については1986年、腐食の中でも塩害は1987年、がそれぞれ初出である。これに対して、補修・補強は1976年で、耐久性の初出以前である。ちなみに診断の初出は1988年で、4カ月後には耐久性設計が見られる。

これらを見ていると、現実には種々の問題が生じて、耐久性というものが見直され、耐久性の評価として対応され始めてきた経緯を読み取ることができる。もちろんこれは耐久性に対する検討がそれまで無視されてきていたということではない。

特集号の変遷から見ても、近年になって、耐久性評価にかかわる事項は極めて多くなってきていると言ってよい。これは、凍害や中性化以外のコンクリート構造物の劣化、塩害、アルカリシリカ反応あるいは疲労や化学的侵食などが数多く報告されたことにもよるが、用語の定

義に見られるような目的論的な耐久性に対する考え方の変化、および手法論的な発展がその重要な要因であろう。

耐久性に関する研究では、耐荷性とは異なって、成果を得るためには基本的に長期間を必要とする場合が多い。そのため、研究者はこのテーマを扱うことを避けていたところもあった。しかも、土木技術者や建築技術者は、耐久性評価には要求されることの多い、化学的な内容を嫌って現在の道を選んだ人間も多い。しかし、早急に成果を得るための促進試験方法の開発はもちろん、劣化機構に関わる微細構造、種々の物質の分析や解析あるいはシミュレーション技術の発達は今35年前とは比較にならない。これらの加速要因が耐久性に関わる研究を強力に推進したと考えられる。かぶりコンクリート中の塩化物イオンの定量化などはその典型的なものであろう。

しかも、各種の規準が仕様規定から性能規定に移行しようとするときに、耐久性についても仕様規定ではなく性能規定であることが求められた。言い換えれば、性能規定のツールである性能の照査と明示が要求されることとなったのである。耐久性照査が実務的にも要求されるに至れば、技術者もそれに応えざるを得ない。この行為においては、耐久性の評価が不可欠となる。

3. 塩害における例

ここでは、塩害（写真-3）を取り上げて多少の経緯を辿りたい。1970年代前半に、河川産細骨材の枯渇から、海砂問題が表面化した。1974年には海砂に関する特集号が発刊されている（表-1参照）。塩害に関わる研究は、従来からあった海洋環境によるものに加えて、海砂問題が加速した。それ以降では、凍結防止剤による塩害の問題も顕在化した。なお、当時米国では橋梁の床版の塩害の研究が成果をあげつつあった。また、ヨーロッパでは北海などの海底油田の関係で海洋構造物の塩害研究が盛んであり、腐食発生を目安とした寿命予測的な研究も行われていた。したがって、海外における塩害研究の中心は外来塩分によるものであり、海砂のような材料に起因する内在塩分による塩害ではなかった。

現在我が国の許容塩化物イオンの単位が m^3 となっているのは、この海砂問題の際、海砂による塩化物イオンのみではなく他の材料に起因する塩化物イオンを含めた総量で規制すべきである、という合意の延長線上にあるように思う。その当時、腐食機構から考えてセメントに対する従量で規制値を表現すべきであるという意見も多かった。しかし、重要構造物に用いられる可能性の高い高強度コンクリートあるいは腐食損傷に敏感なプレストレストコンクリートなど、比較的高セメント量の構造物では許容塩化物イオン量が多くなってしまう可能性がある。このことに対する歯止めの意味で現在のような総量表現となった。しかも、総量表現であると一般技術者に馴染みやすく測定もしやすい。したがって、この単位選択には当時の戦略的な意味合いがあったように思う。フレッシュコンクリート中の許容値としては、まず腐食しないであろうという条件の元、当初 0.6 kg/m^3 が基本となり、次いで 0.3 kg/m^3 となった。しかし、PCグラウトについては、近年セメント質量に対する従量表現に改められている。PCグラウトをコンクリートと同様に扱うにはそのセメント量から考えて明らかに無理がある⁶⁾。

維持管理上の腐食発生においては、海塩粒子のかぶりコンクリート中での浸透拡散など外来塩分が問題となる。上記の新設構造物での許容値との整合性、かぶりコンクリート中での塩化物イオンの拡散問題に対して既設構造物でのコア分析値を用いやすいこと、さらに種々の腐食研究や、米国を含めた実構造物での測定値、その当時の海洋コンクリートの単位セメント量の目安である 300 kg/m^3 に対して発錆限界と目されていた 0.4% が 1.2 kg/m^3 であることなどから、 1.2 kg/m^3 に設定された。これについては、歯止めは必要であろうがセメント従量表現も併せた規定の併用が期待されている。

以上の経緯とは違ったのが防食を目安とする許容ひび割れ幅であろう。ひび割れは、コンクリートの連続体の前提を揺るがす存在であり、拡散問題からもきわめて取り扱いにくい。一般には、腐食が発生するまでの期間には影響を与えるが、腐食速度そのものには影響しないと考えられている⁷⁾。しかも、水セメント比が大きな場合にあっては、ひび割れに直接起因する腐食、ひび割れ部腐食は短期間で全体の腐食の中で目立たなくなり、ひび割れの影響は認められなくなってしまう。これに対して、水セメント比が小さな場合においては、少々のひび割れであれば、自己治癒が生じひび割れ部腐食は抑制されてしまう。ひび割れ部腐食の観点からは、これを問題視すべきかどうかの境界となる、言わば許容水セメント比のようなものが存在するのである。

いずれにしてもある程度以下のひび割れ幅であれば、ひび割れ部腐食そのものは、独立して取り上げるような問題とするにあたらない。この場合、水セメント比が小さな場合に、腐食が問題とならないひび割れ幅の限界



写真-4 ASRの例

を、許容ひび割れ幅と考えることができる。したがって、塩化物イオン拡散係数に対するひび割れ幅の影響が示方書等で定められているが、現実の数値ではなく、許容ひび割れ幅以下であっても発生するひび割れの幅をできるだけ小さくしようとする戦略的な数値と考えたほうがよいだろうと思っている。

耐久性評価に当たっては、対象とする劣化機構での平衡論的なアプローチと速度論的なアプローチが必要とされる。例えば、塩害においては、腐食するか否かの判断と腐食速度とは異なったアプローチが要求される。前者では塩化物イオン量が極めて重要視されるのに対して、後者では塩化物イオンに加えて酸素供給量や電気抵抗なども取り扱う必要がある。この現実に関連して、両者では計測、分析手法や解析・シミュレーション手法も当然相違する。しかも、これらによって得られた腐食量がどのような変状となってひび割れや剥離剥落等の劣化現象を示し、さらには部材性能の低下をもたらすかという段階になれば、さらにその必要な手法は異なる。しかし、速度論的なアプローチ以降については、現在においても研究成果は不十分であり、今後きわめて必要とされるところである。

なおアルカリシリカ反応（写真-4）においては、塩害ほどにはまだ耐久性評価が十分ではない。骨材の反応性あるいはコンクリートの反応性についてはある程度明確になってきてはいるものの、現実の構造物においてどの程度膨張し、変状を生じるかについては、まだまだ把握できてはいないと言ってもよい。

4. 耐久性評価と仕様規定、耐久性能、耐久性照査

4.1 仕様規定

仕様規定においては、各種条件化においてコンクリートの水セメント比、かぶりなどが定められているが、これらの数値は、実績を元に安全性を大枠で担保することが主眼であったと思われる。耐荷性における設計計算は耐久性が確保されていることが前提なのである。また、コンクリート強度が所定のレベル以上であれば、中性化

に対する抵抗性や塩化物イオンの浸透拡散抵抗性も満足するものと考えられがちであったことは、設計は強度設計のみで十分であるとの誤解を生んだように思う。仕様規定においては、これらの仕様を満足しているかどうか、言わば擬似的な耐久性の評価であるとみなすことができた。したがって、平衡論的なものと速度論的なものが分離はされずに一般的な供用期間の間というあいまいな中で判断されていたと言ってよい。

工学は経験に基づいて形作られてきた部分が多い。仕様規定はこの経験に大きく依存する部分が多かったものと思われる。したがって、この経験則の経験範囲を逸脱する場合、言い換えれば用いる材料や環境条件、供用期間などが大きく異なれば当然仕様は変えなければならない。しかし、その詳細な仕様修正方法までは必ずしも確立されてはいず、技術者が適切に修正する必要があった。そのため、仕様規定を満足してはいても、特に供用期間が長くなると、実は必ずしも安全側ではない場合があった。ところが、耐久性は確保されているとの誤解を生みやすかったのである。

4.2 耐久性

RILEM のコンクリート関係委員会に参与しておられた白山先生から、セメント協会の講習会であったか、「耐久性」の話を伺った。耐久性ではなく耐久性能としての視点が必要であるという論旨であった。その英語表現を見て私には興味深いものがあった。耐久性は“Durability”で、耐久性能は“Performance over time”であるというお話であった。

耐久性の能力というアプローチではなく、性能がどのように確保できるかという能力であることが私には興味を引かれた。私の独断であるがこれは今の性能規定の流れにも連なる思想であり、コンクリート標準示方書およびJASS 5での広義の耐久性に近い。塩害を例にとれば、もし、コンクリート部材の性能が低下しないのであれば、腐食などいくら生じてもかまわないのである。これは、ASR、中性化、凍害、化学的侵食あるいは疲労、すり減りなど、どの劣化機構でも同様である。したがって、構造物の性能に関わる視点から耐久性評価を行う必要がある。そのためには、構造物あるいは部材の要求性能を考慮した耐久性に基づく限界状態を定義し、定量的な検討を行うのがもっとも簡便であり、実用的である。

4.3 耐久性照査

現在の土木学会コンクリート標準示方書においては、耐久性の評価は耐久性照査の形で行われる。建築学会でも用語等は異なるが同様の思想であろうと思う。その中では、平衡論に必要な物質および速度論に必要な物質の存在・移動・集積等が耐久性照査に当たってきわめて重要である。これらの解析・予測技術が発展したことが我々にとっては大きな武器となっている。

しかし現在の耐久性照査にはまだまだ問題点も多い。

要求すべき限界状態の設定をどのレベルで行うのか、種々のデータや経験の不足など、耐久性照査と謳っているがまだまだ完璧なものではないのである。コンクリート構造物設計の本来は、与えられた時空間の中でコンクリート構造物を適切に挙動させることである。しかし、時間軸でのコンクリートおよびコンクリート部材の性能の評価にはいまだ完璧には成功していないのが現実である。

塩害であれば、要求すべき限界状態が腐食発生であるのか、腐食ひび割れ発生であるのか、剥落発生であるのか、あるいは耐荷性を目安とするのか、これらによって照査すべき項目は大きく異なってくる。しかも、腐食ひび割れが発生する腐食量はまだ必ずしも明らかではない。実は、腐食発生塩化物イオン濃度でさえまだ完璧に把握しているとはいえないところがあるのである。さらに、補修・補強後の耐久性に至っては、まだまだ検討されていない事項が多い。

5. 耐久性評価のこれから

インフラ、社会基盤を構成する施設・設備は、種々のハザードシナリオ中で安定してその機能を市民に提供しなければならない。そのインフラの代表的な構成要素であるコンクリート構造物あるいはそれらからなるシステムは市民社会を支え続けなければならないものであるため、基本的には“丈夫で美しく長持ち”する必要がある。

コンクリート構造物は、単なる工場製品ではない場合が多く、電気製品などとは異なって、発注時にはまだ影も形もなく、その最終の品質は現実化されてはいない。言い換えれば、製造成果としての製品ではなく、建設プロセスを含めた一品生産の構造物の購入を行っている。したがって、最安値のものを無条件に購入することにはきわめて危険が伴う。なかでも、耐久性はこの費用中に適切で定量的に組み込まれることが少なく、従来なおざりにされがちであったと言ってよい。このなおざりにされていたハンディを覆すためには、適切な耐久性の評価が行われることが必要なのである。この場合、現在軽視されがちになってきている先人の経験則をうまく取り入れることもまた重要である。

しかも、コンクリート構造物に要する、環境を含めた広義の費用は、設計や施工ばかりで必要とされるのではない。計画・設計・施工・維持管理のすべてにその費用は発生する。*fib* のモデルコードでもシナリオの重要性に触れられているようであるが、設定すべき生涯シナリオをデザインし、計画・設計・施工・維持管理によって現実化することが大きな課題となっている。この行為を通じてはじめて、適切なストックマネジメントが可能なのである⁸⁾。

近年いろんな場面で取り上げられている“持続可能な発展”においては、“One principle, two goals, three di-

mensions, four requirements and five phases⁹⁾”などと語られることも多い。そのうちの工学的な部分については、いずれをとっても耐久性の評価が必須である。創造的なシナリオデザインに基づき、耐久性の評価による実体化を通じて、我々が子孫によき地球を残すことが望まれているのである。

本文の校正中に、東北太平洋沖地震に起因する東日本大震災の報告が飛び込んできた。津波の中で毅然として存在するコンクリート構造物も見られ、コンクリート構造物が果たすべき役割の重要性を深く感じざるを得ない。コンクリート構造物は、建設すればそれで良いというものではなく、要求される機能を満足する性能を供用期間の間保持しなければならない。コンクリート構造物には高い耐久性が必要であるとともに、その評価が的確に行われることが必要であることを、あらためて確信した次第である。

震災においてお亡くなりになった方々に謹んでお悔やみ申し上げるとともに、被害を受けられた方々には心か

らのお見舞いを申し上げたい。

参考文献

- 1) 菅 健彦：9割超の自治体が社会資本の更新・維持管理に悩み、日経コンストラクション、No.508, p.16, 2010. 11
- 2) セメント協会：セメント技術年報、29巻、1975. 12
- 3) 土木学会：第30回土木学会年次学術講演会講演概要集 第5部、1975. 10
- 4) 日本コンクリート工学協会：第1回コンクリート工学年次講演会講演論文集、1979. 5
- 5) 例えば、日本コンクリート工学協会：コンクリート工学総目録、2005. 7
- 6) 二井谷教治・徳光 卓・山田一夫・野島昭二・宮川豊章：PCグラウトの塩分濃度が鋼材腐食に及ぼす影響、プレストレストコンクリート、Vol.52, No.1, pp.76~84, 2010. 1
- 7) 例えば、A. Bentur, N. Berke & S. Diamond：4.3.2 Cracked Concrete Cover, Steel Corrosion in Concrete, Taylor & Francis, pp.49~52, 1997. 10
- 8) 宮川豊章：インフラ施設・設備の高耐久化、延命化、プレストレストコンクリート、Vol.53, No.2, pp.2~6, 2011. 3・4（印刷中）
- 9) 例えば、Yaojun Ge：New Century's Challenge:Sustainability, Structural Engineering International, Vol.20, No.3, p.233, 2010. 3
- 10) 土木学会：コンクリート標準示方書
- 11) 日本建築学会：建築工事標準仕様書 JASS 5
- 12) 宮川豊章ほか：塩害（Ⅰ）・（Ⅱ）、技報堂出版、1986. 5・1991. 4