解説

コンクリート構造物の劣化と問題点

上田 隆雄*, 宮川 豊章**

* 徳島大学大学院 ソシオテクノサイエンス研究部 エコシステムデザイン部門

** 京都大学 大学院 工学研究科 社会基盤工学専攻

Deterioration of Concrete Structures and Some Relevant Issues

Takao Ueda* and Toyoaki Miyagawa**

* *Department of Civil and Environmental Engineering, Graduate School of Engineering
The University of Tokushima*** *Department of Civil and Earth Resources Engineering, Graduate School of Engineering
Kyoto University*

Performances of concrete structures should be decreased with time due to some mechanisms of deterioration such as chloride attack, carbonation of concrete and alkali aggregate reaction. Considering the establishment of an appropriate maintenance system for such structures, there are many problems to be solved. In this paper, deterioration cases of concrete structures are outlined, followed by the explanation of some investigations to build the maintenance system and remained issues, regarding mainly the problem of steel corrosion in concrete.

Keywords : concrete structure, deterioration mechanism, steel corrosion, maintenance system, repair method, scenario design

1. は じ め に

かつての、コンクリート構造物はメンテナンス・フリーで半永久的な寿命を持つという、いわゆる「コンクリート神話」は過去のものとなり、今やコンクリート構造物の劣化問題は、深刻な社会問題の一つと言っても過言ではない。では、「コンクリート神話」は全くのでたらめだったのか？という現実の部分もあり、実際に50年以上にわたり、ほぼメンテナンス・フリーで供用され続けてきた第一戸川橋梁(図1)のような例もある。この橋梁は、我が国初の本格的ポストテンションPC桁を採用した鉄道橋であり、1954年に旧日本国有鉄道により架設されたものであるが、現在においても全く中性化していない極めて健全なコンクリートの状態を保持していたことが報告されている¹⁾。

このように、適切に設計・施工・維持管理がなされたコンクリート構造物は、良好な性能を長期間にわたって発揮できるものであるが、一方で、コンクリート構造物の特性を十分に認識できなかったために、非常に短期間で劣化が顕在化するケースも依然として多いのが現状である。コンクリート構造物は、これまでも、そして、今後も社会基盤の中核をなす重要な役割を担っている。このため、新設の構造物については、早期に劣化することのない、十分な耐久性を有するものでなくてはならないし、既設の構造物については、適切な維持管理システムの中で、所定の期間を通じた性能の保持を保証していかなくてはならない。その際に重要となるのは構造物の「戦略的なマネジメント」であり、「場当たりのマネジ

図1 信楽高原鐵道第一戸川橋梁

メント」では、予定された供用期間を全うすることは困難である。すなわち、将来にわたる構造物の劣化進行を予測し、補修・補強などの対策効果も含めてその構造物に最適な一生を設計する、いわゆるシナリオデザインの考え方²⁾の導入が求められる。

本稿では、コンクリート構造物の劣化状況を概観するとともに、その対策としての、耐久性照査型設計、防食・補修工法などの現状と問題点、および、これらを含めたシナリオデザインの考え方を概説する。

2. コンクリート構造物の劣化機構

コンクリートは、それ自身が複合材料であるとともに、鋼材との組み合わせで構造物を形成する場合がほとんどであることから、劣化形態は複雑かつ多様である。コンクリート構造物の劣化現象の分類例を図2に示す。図2に示されるように、コンクリート構造物の劣化は一般にコンクリート自身の劣化と、コンクリート中の鉄筋腐食に分類される³⁾。

コンクリート自身の劣化機構として代表的なものに

* 〒770-8506 徳島市南常三島2-1 (2-1, Minamijosajima, Tokushima, 770-8506 Japan)

** 〒615-8540 京都市西京区京都大学桂 (Kyoto-daigaku Katsura, Nishikyo-ku, Kyoto, 615-8540 Japan)

図2 コンクリート構造物の劣化現象の分類例³⁾

は、凍害(凍結融解)、アルカリ骨材反応、化学的侵食、疲労などがある。凍害は、冬場に寒暖の差が激しくなる地域で発生しやすく、北海道、東北地方や、山間部で多く見られる劣化現象である。劣化メカニズムとしては、コンクリート中の水分が凍結する際の体積膨張により、空隙中に大きな静水圧が発生し、これがコンクリートの引張強度に達したときにひび割れが発生するものと考えられている。劣化形態の代表的なものとしては、構造物の表層部分が剥がれ落ちるスケーリング(図3)や、骨材が表層から円錐状に剥離するポップアウトなどが挙げられる。凍害は、凍結防止剤の散布によって劣化が加速することが知られている。アルカリ骨材反応は、コンクリートの細孔溶液中のアルカリ金属イオン(Na^+ , K^+)が骨材中の反応性珪物と反応することで、アルカリシリカゲルを生成し、このゲルの吸水膨張によってコンクリートにひび割れが生じる現象である。劣化状況は図4に示すように、コンクリート表面に亀甲状のひび割れが発生し、そこから白色のゲルが浸出するケースが多い。また、近年では、図4に示したような、コンクリート中の鉄筋破断現象も報告⁵⁾されている。鉄筋破断については、節形状、曲げ加工時発生微小亀裂、曲げ加工部強度(800 N/m^2 以上⁶⁾)、曲げ加工による破壊靱性低下など以外にも、現実のコンクリート構造物中の拡散性水素量(0.1 ppm程度⁷⁾)、ASRによるような低ひずみ速度における速度依存性⁸⁾など検討すべき事項はまだ多く残されている。

図3 凍害によるスケーリング

図4 アルカリ骨材反応によるひび割れ状況とコンクリート中の鉄筋破断

しかも、現実にはコンクリート中で破断した鉄筋そのものに関して、まだまだ種々の情報が不足している。

コンクリート中の鉄筋腐食を引き起こす劣化機構としては、中性化と塩害が挙げられる。コンクリート中の鉄筋は一般にコンクリート内部のアルカリ性に起因して生成する不動態被膜によって腐食から守られているが、中性化あるいは塩害によって不動態被膜が破壊されると、腐食反応が進行する。中性化はかぶりの薄いコンクリート構造物でよく見られる現象であり、図5に示されるように、鉄筋上部の薄いかぶりコンクリートの浮きや剥離が発生する。中性化反応は下式で示され、大気中の CO_2 を吸収することで、コンクリート中のアルカリ性保持の役割を担う $\text{Ca}(\text{OH})_2$ が CaCO_3 に変化してコンクリートのpHが低下する。

図5 中性化による鉄筋腐食

図6 塩害による鉄筋腐食

pH の低下によって不動態被膜が破壊されると鉄筋腐食が開始し、腐食生成物の膨張圧でコンクリート内部からひび割れが発生する。塩害の場合には、海砂などから供給される内在塩分、海洋環境などでコンクリート外から供給される外来塩分の、いずれかの供給方法によって

コンクリート中に塩分が供給され、鉄筋位置の塩分濃度が限界値に達すると不動態被膜が破壊されて腐食が開始する（図6）。腐食開始後の劣化進行は基本的に中性化と同じであるが、一般に中性化はミクロセル腐食が卓越する全面腐食、塩害はマクロセル腐食が卓越する局部腐食となりやすく、腐食速度は塩害の方が大きい傾向がある。

3. 耐久性照査の現状

前章で示したような種々の劣化機構に対して、十分な耐久性を有するコンクリート構造物を設計するため、土木学会では、コンクリート標準示方書の中で、耐久性照査の考え方を導入している。塩害に関する耐久性照査フローを図7に示す。図7において、左端の上下方向の矢印で示したように、横線で区切られた上部が現行のコンクリート標準示方書の考え方である腐食開始を限界状態

図7 塩害に関する照査フロー⁹⁾

図8 鋼材腐食発生限界 Cl^- 濃度測定用の試験装置¹⁰⁾

とした照査であり、下部が今後の導入が期待されている腐食ひび割れ発生を限界状態とした照査である。すなわち現行の示方書では、コンクリートの配合条件や、構造物の曲げひび割れ幅などを考慮して、 Cl^- の設計拡散係数 D_d を設定する。さらに、環境条件を考慮して表面 Cl^- 濃度 C_0 を設定して、これらの値を拡散モデルに適用することで、将来における鋼材位置の Cl^- 濃度を算出し、鋼材腐食発生 Cl^- 濃度 C_{lim} と比較することで、腐食開始の有無を照査する。ただし、この場合、構造物の性能としては相当に安全側の評価となるため、今後は、腐食発生後の鋼材腐食速度を用いて将来における鋼材腐食量を算出し、腐食ひび割れ発生限界腐食量 W_{lim} と比較することで、腐食ひび割れ発生を限界状態とした照査体系の構築が進むものと考えられる。現状では、設計時に鋼材腐食速度を予測することが困難であるとともに、腐食ひび割れ発生限界腐食量 W_{lim} の値にも、報告によって大きなばらつきが見られるなど、課題は多い。

現行の示方書では、鋼材腐食発生 Cl^- 濃度 C_{lim} として、 1.2 kg/m^3 を設定しているが、コンクリートの配合条件などにより異なるものと考えられ、実験室レベルで C_{lim} の真値を得るために種々の検討がなされている。例えば、図8に示すように、鉄筋と照合電極を埋め込んだコンクリートの供試体に塩水を外部から供給し、この間の鉄筋の自然電位のデータを連続的に測定する。さらに、供給された Cl^- によって鉄筋の自然電位が急変した瞬間を捉えてコンクリート中の Cl^- 濃度分布を測定し、鉄筋表面位置の Cl^- 濃度を鋼材腐食発生 Cl^- 濃度 C_{lim} として算出するという手法である。これは一つの検討例であるが、測定方法によって C_{lim} の値が大きく異なることなどが問題点として挙げられている。

土木学会コンクリート標準示方書では、ここで紹介した塩害以外にも、中性化、凍害、アルカリ骨材反応、化学的侵食、疲労、すり減りなどの劣化機構についても耐久性照査を行うことを規定しているが、凍害やアルカリ骨材反応などのコンクリート劣化については、設計段階での定量的な性能照査には課題が多いのが現状である。

4. 劣化診断と補修・補強対策

劣化の有無にかかわらず既設の構造物について点検を実施する場合には、種々の手法を用いて調査・診断を行い、構造物の現状を把握するとともに、将来における劣

化進行を予測する。さらに、予定供用期間中に構造物の性能が要求性能を満足しないと判定された場合には、補修・補強などの対策が必要になる。

鉄筋腐食によって劣化した構造物の場合について、主な調査方法を表1に示す。劣化の状態を直接的に把握するには、コンクリートをはつりにとって内部の鉄筋を露出させることが最も確実な方法と言えるが、構造物にダメージを与えることや、多大な労力が必要で効率的でないことなど問題点が多い。そこで期待されているのが、非破壊検査手法あるいは微破壊検査手法と言われるものである。特に鉄筋腐食の測定手法としては、自然電位、分極抵抗やコンクリート抵抗率を測定する、電気化学的手法が主流となっている。自然電位法は、コンクリート表面などに設置した照合電極とコンクリート中の鉄筋との電位差を測定し、その値によって鉄筋の腐食状態を推定する手法であり、比較的安価な装置を用いて簡易に構造物中の腐食分布を推定できるため、よく用いられる手法である。ただし、自然電位の値のみでは、構造物の劣化予測などの定量的評価は難しい。これに対して分極抵抗法は、図9に示したような装置を用いて、コンクリート中の鉄筋に微弱な電流を流し、腐食電流の流れにくさを表す分極抵抗を測定するものである。自然電位法よりも高価な装置が必要となり、測定にはやや高度な技術も必要であるが、分極抵抗が得られれば、下記の式によって腐食速度が算出できる点が大きな利点である。

$$I_{\text{corr}} = k(1/R_p) \quad (2)$$

ここに、 I_{corr} ：腐食電流密度 (A/cm^2)、 R_p ：分極抵抗

表1 鉄筋腐食に対する主な調査方法⁹⁾

調査の区分	調査の方法	評価項目
目視点検 (たたき調査含む)	ひび割れ、剥離、剥落、錆汁、遊離石灰、変色、漏水、変位・変形、鉄筋腐食状況(鉄筋露出時)	構造物の外観上のグレード 鉄筋の腐食のグレード
	はつり調査	鉄筋径 腐食減量
微破壊 非破壊 検査	自然電位法	自然電位
	交流インピーダンス法	分極抵抗
	直線分極抵抗法	分極抵抗
	四電極法	コンクリート抵抗率
非破壊 検査(研究段階)	位相角法	電気2重層容量
	電磁パルス法	
	AE法	
	電磁誘導加熱法	
埋設 センサ	自然電位	腐食の可能性
	マクロセル腐食電流	深さ方向の腐食環境の変化を評価
	電気抵抗	
	電位差	腐食の有無、速度
	分極抵抗	
非破壊 非接触	pHセンサ	腐食環境
	近赤外分光法	コンクリートの表層部の塩化物量
非破壊	電磁波法	かぶりコンクリートの塩化物量

図9 分極抵抗測定方法の例⁹⁾

($\Omega \cdot \text{cm}^2$), k : 比例定数を示す。

上式に示した I_{corr} が腐食速度に相当し、この値が算出できれば、鉄筋腐食進行による劣化予測が可能となる。ただし、現状では(2)式中の比例定数 k の値に諸説があり、精度の高い腐食量推定にはまだ課題が残されていると言える。

劣化したコンクリート構造物の補修工法には多くの種類があるが、代表的なものを挙げると図10に示す通りである。比較的古くから用いられ適用実績の多いのは、表面被覆工法や断面修復工法であるが、劣化状況によっては効果が小さく再劣化の可能性もあることから、近年注目されているのが電気化学的手法である¹¹⁾。代表的な電気化学的手法である脱塩工法と再アルカリ化工法について、その原理を図11に示す。これらの手法では、共通してコンクリート構造物の表面部分に陽極材を設置し、コンクリート中の鉄筋を陰極として直流電流を供給する。これにより、脱塩工法の場合には、塩害の原因となるコンクリート中の Cl^- が陽極材のあるコンクリート表面方向に電気泳動によって移動し、コンクリート外に抽出できる。再アルカリ化工法は、コンクリート表面の陽極材近傍に保持したアルカリ性の電解液が中性化したコンクリート中に電気浸透によって移動し、コンクリートの pH を上昇させることができる。いずれの手法も本格的に適用され始めて10年程度の新しい工法であるが、効果が確認されることで施工実績を伸ばしている。

図10 主な補修工法の種類⁴⁾

図11 脱塩・再アルカリ化工法の原理

このような補修・補強工法を適用する際に今後必要となるのは、各工法が構造物の性能に与える影響を明確にし、それによる延命期間を定量的に示すことである。補修工法が構造物の性能や延命期間に与える影響を概念的に示したのが図12である。図12の上のグラフは縦軸が工法の性能低下を示しており、下のグラフは構造物の性能低下を示している。例えば、表面被覆工法を例にとると、コンクリート表面に接着した表面被覆材は経時的に劣化し、コンクリート表面との付着強度も低下していく。これが工法の性能低下であるが、工法を適用した構造物は、工法の適用によって一度は上昇した性能が、その後は工法の性能低下の影響を受けつつ、構造物としての性能も経時的に低下する。このような工法と構造物の相関関係を考慮した性能の経時変化を捉えることで、工法による延命効果が算出できる。今後のデータの蓄積によってこのような効果を精度良く評価できるモデルの構築が必要である。

5. シナリオデザイン

近年、構造物に要求される本来のコストとして、ライフサイクルコスト (LCC) を用いるべきであるということがようやく認められるに至っている。しかし、ライフサイクルコストは、性能照査と同様に単なる計算技術で

図12 補修工法の適用が構造物の性能に与える影響⁹⁾

あり、ライフサイクルの基本となるシナリオを創造する能力こそが今要求されている。これにより、コンクリート構造物を空間的にも時間的にも自由自在に設計できると言えるのであって、21世紀の“持続可能な発展”を達成することができるのである。

コンクリート構造物の劣化に対して、適切な対策を策定するためには、シナリオの構築と選定がきわめて重要である。構造物をどのように機能させたいかあるいはすべきか、という空間的かつ時間的なシナリオがあって初めてLCCなどの具体的な算出が可能となる。例えば前述の図7においては、補修工法の適用時期として、構造物の劣化段階の進展期とした場合と、加速期とした場合のイメージを示している。図7を塩害の例で考えると、コンクリート中の鉄筋腐食は開始しているが、腐食ひび割れは顕在化していない進展期に補修工法を適用した場合、腐食ひび割れが拡大する加速期に適用した場合と比較して、工法自身の性能低下速度が小さく、これに伴って工法の限界までの期間および構造物が要求レベルを満たす延命期間が長くなっている。すなわち、早めの対策が効果を増大させるということを示している。これも一つのシナリオ比較例であるが、適切なシナリオに基づいてコストあるいはリスクなどを計算し、その最適化を元に維持管理を行った場合にはじめて、構造物のマネジメントは適切なものとなる。

社会基盤構造物の多くは市民のものである。したがって、構造物をどのように使いこなすかについてのシナリオを市民に説明する責任が技術者にはある。コンクリート構造物の性能、品質を語る場合、その本来の所有者あるいは利用者である市民に対する説明責任を果たすための努力が必要な時代が到来しつつあると言える。

6. おわりに：腐食工学に期待するもの

本稿では、コンクリート構造物の劣化問題について概観したが、本来のコンクリート構造物は“美しく、丈夫で、長持ち”するべきものであり、私たちはこのような良質の資産を後世に残していく義務がある。このような

義務を果たしていくためには、コンクリート構造物の複雑な劣化現象に適切に対処していかななくてはならない。その際には、コンクリート工学の知識や技術だけでは自ずと限界がある。例えば、コンクリート中の鉄筋腐食問題を検討するには、金属工学、腐食工学、電気化学などの専門知識が不可欠である。これらの専門知識を有する本誌読者諸氏においては、是非ともコンクリートの分野にも興味を持っていただき、今後の活発な交流を期待するものである。本稿がこのような異分野交流のきっかけとなれば望外の喜びである。

参 考 文 献

- 1) 土木学会，構造物表面のコンクリート品質と耐久性能検証システム研究小委員会（335委員会）成果報告書およびシンポジウム講演概要集，コンクリート技術シリーズ80（2008）。
- 2) T. Miyagawa, *Contr. J. JCI*, **36** [7] 4（1998）。
- 3) 日本建築学会，鉄筋コンクリート造建築物の耐久性調査・診断および補修・補強指針（案）・同解説（1997）。
- 4) 日本コンクリート工学協会，コンクリート診断技術'09（2009）。
- 5) 土木学会，アルカリ骨材反応対策小委員会報告書—鉄筋破断と新たな対応—，コンクリートライブラリー，No.124（2005）。
- 6) Toyoaki Miyagawa, Kaoru Seto, Kazunori Sasaki, Yasuhiro Mikata, Kazuhiro Kuzume and Toshikazu Minami, Fracture of reinforcing steel in concrete structures damaged by alkali-silica reaction—Field survey, mechanism and maintenance, *Journal of Advanced Concrete Technology*, **4** [3] 339（2006）。
- 7) 佐々木孝彦，宮川豊章，松山晋作，飯島 亨，アルカリ骨材反応による鉄筋破断事例，土木学会第61回年次学術講演会講演概要集5，p.111（2006）。
- 8) Masato Kobayashi, Atsushi Nishikawa and Tooru Tsuru, Hydrogen embrittlement of reinforced steel in high alkaline environments, *Marine Corrosion and Control*, p.93（2006）。
- 9) 土木学会，コンクリート中の鋼材腐食性評価と防食技術研究小委員会（338委員会）委員会報告書（2009）。
- 10) (財)エンジニアリング振興協会，自然電位によるコンクリート中の鋼材の腐食発生限界塩化物イオン濃度試験方法（案），戦略的技術開発（構造物長寿命化高度メンテナンス技術開発）（2007）。
- 11) T. Miyagawa and T. Ueda, *Contr. J. JCI*, **38** [3] 9（2000）。

（2009年11月12日受理）

要 旨

コンクリート構造物は、塩害や中性化、アルカリ骨材反応といった様々な劣化機構によって、経時的に性能が低下していく。このような構造物を適切に維持管理していくためには、まだ種々の問題があるのが現状である。本稿では、コンクリート構造物の劣化問題を概観するとともに、コンクリート中の鉄筋腐食問題を中心に、今後の維持管理システム構築にあたっての取り組みの現状と、解決すべき問題点を示す。

キーワード コンクリート構造物，劣化機構，鉄筋腐食，維持管理システム，補修・防食工法，シナリオデザイン