

# 鉄筋コンクリート構造物の劣化を予測する

曾我部 正道  
 鉄道力学研究部  
 (構造力学 主任研究員)

谷村 幸裕  
 構造物技術研究部  
 (コンクリート構造 研究室長)



そがべ まさみち



たにむら ゆきひろ

## はじめに

鉄筋コンクリート構造物(以下RC構造物と略します)は、適切な材料選定、配合設計、施工が行われれば、経年劣化に対して高い耐久性を有しています。しかしながら高度経済成長期に大量に建設されたRC構造物については、品質に相当のばらつきがみられ、鉄道構造物においても、様々な変状が報告されています。

こうした変状を管理するために、従来のRC構造物の維持管理では目視を主体とした評価を行ってきました。しかし近年では、予防保全やアセットマネジメントの観点から定量的な評価を行い、目視による評価を補完していこうという動きが高まりつつあります。

本稿では、平成19年1月発刊の鉄道構造物維持管理標準・同解説(構造物編)コンクリート構造物(以下、維持管理標準という)<sup>1)</sup>で提案された、RC構造物の定量的な劣化予測の手法について紹介します。

## 劣化予測の基本

図1にRC構造物の概念図を示します。補強されていない、いわゆる無筋のコンクリートは圧縮力に強く引張力に弱いという性質があります。コンクリートの引張強度は圧縮強度の1/10程度となるため、例えば図中に示すように、桁に列車や自重が載ると、桁の下面に引張力が働き桁は壊れてしまいます。この欠点を補うために考案されたのが鉄筋コンクリート構造です。この構造は、引張力に強い鉄筋を、コンクリート内部の引張力が生じる場所に配置するものです。

この構造にはもう一つ利点があります。鉄は空気中では腐食しやすい(錆びやすい)という欠点がありますが、コンクリートは高アルカリ性であるため、鉄筋をコンクリートの内部に配置し、「かぶり」と呼ばれる保護層を確保すれば、コンクリートが腐食しやすい鉄筋を保護してくれるのです。

また鉄とコンクリートは、線膨張係数が概ね等しい、つまり熱を受けた場合の伸び縮みがほぼ等しいという相性の良さも併せ持っています。このような背景から鉄とコンクリートのハイブリット構造である鉄筋コンクリートは広く普及して、現在の都市基盤設備にはなくてはならない存在となっています。

しかし一方では、前述のように高度経済成長期に建設された経年40年程度のRC構造物には変状が散見され社会問題となっています。

図2にRC構造物の変状の例を示します。図中に示したものはコンクリートのひび割れとはく離、はく落です。建設後80年が経過しても変状が発生しない、良質な施工が行われたRC構造物がある一方で、図に示すように早期劣

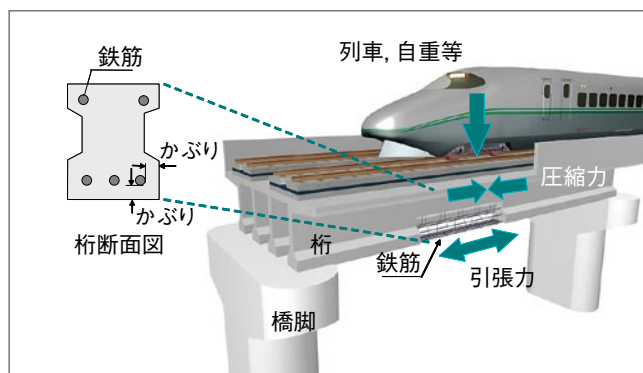


図1 鉄筋コンクリート構造物の概念図



(a) ひび割れ

(b) はく離・はく落

図2 コンクリート構造物の変状の例

化する構造物も少なくありません。

このような構造物の劣化のメカニズムと進行を説明するために、近年、構造物の維持管理の分野において用いられているのが、構造物の変状の状態を幾つかの段階に区分けし、それぞれの期間の長さを予測する手法です。

図3に鉄筋の腐食を伴うRC構造物の劣化のメカニズムを示します。図は、変状の過程を、鉄筋の腐食量とコンクリート内部の状態に着目して定量的に説明したものです。

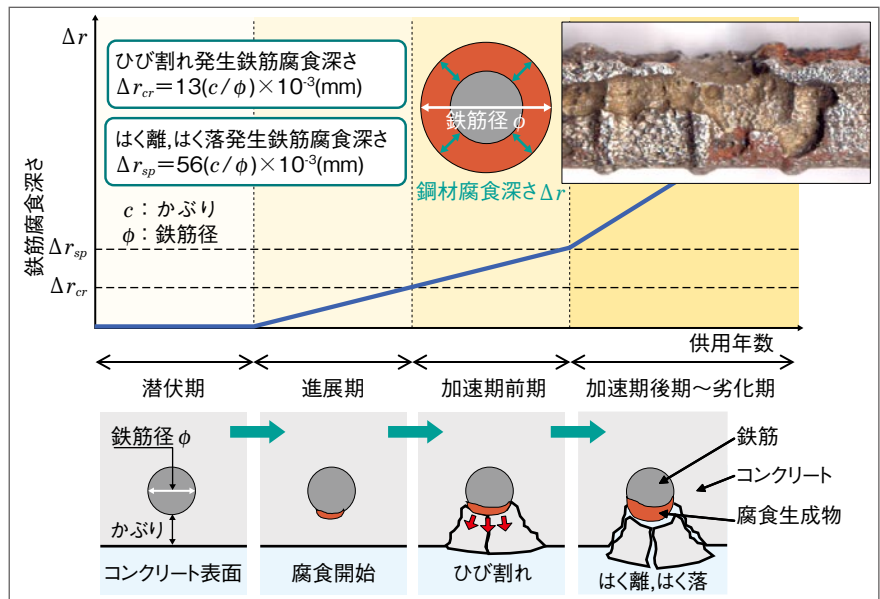


図3 鉄筋の腐食を伴うRC構造物の劣化のメカニズム

ここで潜伏期とは、変状の原因となる劣化因子は侵入しつつあるが、変状自体は生じていない状態を指します。

進展期とは、コンクリートの表面や内部、鉄筋には軽微な変状が生じていますが、変状が顕在化しておらず、外観上の変化がほとんど見られない状態を指します。進展期に入り腐食開始の条件が整うと、一定の腐食速度で鉄筋の腐食が進み、腐食深さが深くなっていきます。

鉄筋の腐食速度は、変状原因の種類、変状を左右するパラメータ、構造物の環境条件によって異なりばらつきが大きいことが知られていますが、維持管理標準では、平均的な推奨値を用いてまず予測を行い、これを事後の検査に基づき補正していく手法が提案されています。

鉄筋が腐食すると腐食生成物の体積膨張によりコンクリート表面に引張力が生じ、コンクリートにひび割れが発生します。どのくらい鉄筋が腐食すると、コンクリート表面にひび割れが発生するのかは、鉄筋の径、かぶり、隣接する鉄筋との間隔に依存しますが、維持管理標準では数値解析や実験結果に基づき、これをかぶり $c$ と鉄筋径 $\phi$ の関数として与えています。

加速期とは、コンクリートの表面にひび割れが発生し、あるいは、はく離、はく落が発生するなどして、変状が顕在化している状態を指します。加速期を前期と後期に分けたのは、はく離、はく落というイベントが構造物の公衆に対する安全性において重要であること、はく離、はく落が生じるとコンクリートの保護層が完全に失われ、腐食速度が増加するためです。はく離、はく落が発生する鉄筋の腐食量もひび割れ発生と同様に、数値解析や実験結果に基づき、かぶり $c$ と鉄筋径 $\phi$ の関数として与えられています。

劣化期とは、コンクリートのはく離、はく落による断面

の減少や鉄筋の腐食等により耐荷力の顕著な低下等が生じる時期を指します。劣化期については、耐荷力低下が問題となる鉄筋の腐食量が各構造物の設計時の保有安全度により異なるため、個々の変状と構造物ごとに判断することとなります。

維持管理標準では、上記の劣化予測の基本に基づき変状原因の種類ごとに、詳細な劣化モデルが示されています。本稿ではとくに、鉄道RC構造物において最もよく見られる中性化と内的塩害を取り上げ、以下に詳述します。

### 中性化による劣化の予測

図4に中性化のメカニズムを示します。硬化したコンクリートは内部に細孔と呼ばれる微小な孔を有しています。この細孔には細孔溶液と呼ばれる水が存在しています。健全なコンクリートでは、この細孔溶液は、含有される水酸化カルシウム等によりpH = 12以上の高アルカリ性を示し

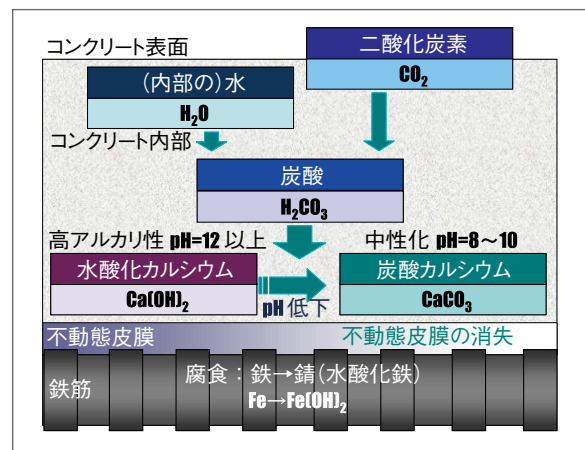
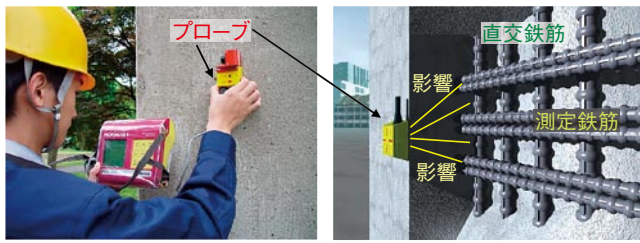


図4 中性化のメカニズム





(a) 鉄筋のかぶり測定 (磁気式電磁誘導法)



(b) 中性化深さ測定 (ドリル法)

図5 かぶり測定及び中性化深さ測定の例

ます。一般にこのような高アルカリ中に置かれた鉄筋は、不動態皮膜に覆われ腐食し難くなります。高アルカリ中で構築される不動態皮膜とは、鉄筋の表面に酸素が吸着し、緻密な酸化層が構築されたものと考えられています。

中性化のメカニズムでは、細孔から大気中の二酸化炭素が侵入し、コンクリート内部の水分である細孔溶液に溶け込み炭酸イオンが形成されます。この炭酸イオンにより、水酸化カルシウムが徐々に炭酸カルシウムに変化し、細孔溶液のアルカリ性が失われていくこととなります。このようにして中性化が進みpHが低下すると、不動態皮膜が消失し、そこに酸素と水が供給されると鉄筋が腐食していくこととなります。

中性化に関する劣化を予測するためには、鉄筋のかぶりと中性化深さを知る必要があります。中性化深さとはコンクリート表面からどの位置まで、コンクリートの中性化が進んでいるかを測定した数値です。

図5にかぶり測定と中性化測定の例を示します。磁気式電磁誘導法によるかぶり測定は、コイルを巻いた探触子(プローブ)に交流磁界を発生させ、高磁性体である鉄筋の影響により変化する探触子と鉄筋間の磁束の変化を、電磁誘導現象により生じるコイル起電力の変化として捉え、鉄筋のかぶりを推定するものです。

ドリル法による中性化深さ測定は、φ10mm程度のドリルによる削孔粉を、フェノールフタレイン1%溶液を噴霧したる紙で受け、ピンク色に発色した時点で削孔を中止して、その深さから中性化深さを求めるものです。3孔の平均値をノギスで計測して中性化深さとし、発色しない部分が中性化した不健全部、発色した部分が健全部です。

図6に中性化による劣化予測結果を示します。中性化深

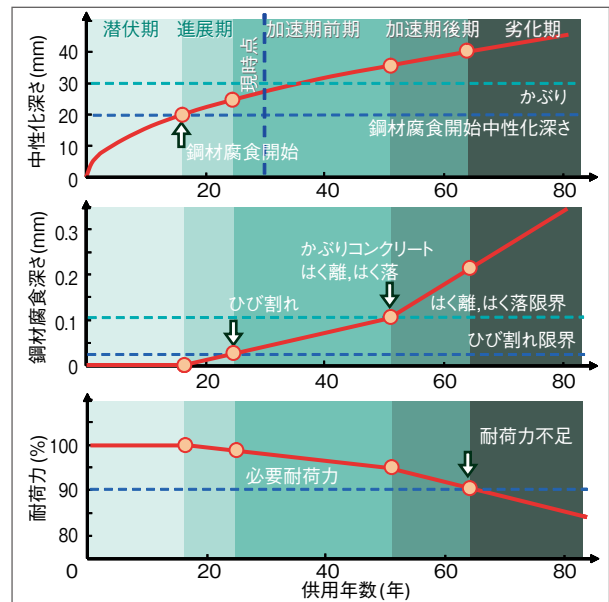


図6 中性化による劣化の予測結果

さは時間の平方根に比例することが知られています。これにより一つ又は複数の測定値から将来的な中性化の進行を予測することができます。フェノールフタレインによる中性化測定ではpH = 10以下が未着色となり中性化と判定されます。一方、これまでの様々な実験により鉄筋はpH = 11程度から腐食し始めることが知られています。このため実務上は、中性化残り、即ち中性化深さとかぶりの差が10mm以下となった時点で鉄筋が腐食し始めると考えて、劣化を予測していくこととなります。

中性化による鉄筋の腐食速度は様々ですが、平均的な値として進展期及び加速期前期に対しては $3 \times 10^3$ mm/年程度が推奨されています。腐食深さが図3に示した限界値に達すると、ひび割れやはく離、はく落が生じます。かぶりがはく落し露出した鉄筋の腐食速度は、概ね $8 \times 10^3$ mm/年程度と考えられています。

桁の耐力の減少は、鉄筋の断面積の減少で考えます。鉄筋の腐食が図3に示したように鉄筋の円周に沿って均等におきると仮定すれば、減少後の断面積は簡単に算出することができますが、実際には局所的な腐食のばらつきと鉄筋形状の変化に伴う応力集中の影響が考えられるため、実務では腐食深さを計算値の2倍として断面積の減少量を評価します。

図6では耐力が10%低下した時点耐力不足として劣化期と判定していますが、劣化期の開始点については前述のように当該構造物の設計時の保有安全度により異なるため、個別に判断することとなります。また腐食量が10%を超えるような場合には、鉄筋とコンクリートの付着力の喪失にも留意していかなければなりません。

以上のような予測結果を、事後の検査で検証しながら腐

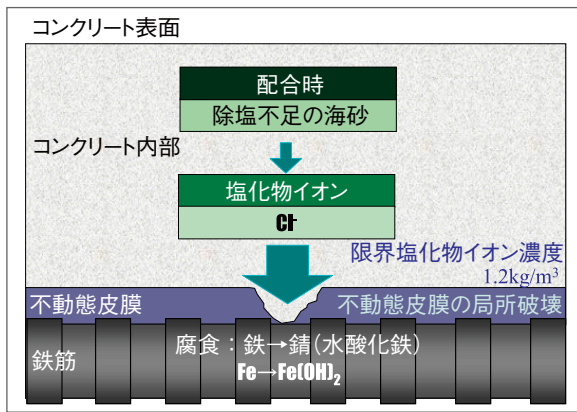


図7 内的塩害のメカニズム

食速度を補正するなどして予測の精度を高めていくこととなります。

### 内的塩害による劣化の予測

図7に内的塩害のメカニズムを示します。内的塩害は、施工時に除塩の不足した海砂を使用すること等により発生します。海砂を使用したコンクリートでは、塩化物イオン濃度が高い値を示しますが、塩化物イオン濃度が鉄筋の腐食発生限度を超えると不動態皮膜が破壊され、そこに酸素と水が供給されると鉄筋の腐食が始まります。この不動態皮膜の破壊は、化学吸着している酸素原子あるいは水分子中に塩化物イオンが割り込み、この部分で皮膜が局所的に破壊されていくと考えられています。なお、本稿では紹介を省略しましたが、海岸線付近において風雨により飛来した塩化物イオンが構造物に付着し、コンクリート中に浸透していくことにより引き起こされる変状を外的塩害と呼びます。

内的塩害に関する劣化を予測するためには、前述の鉄筋のかぶり、中性化深さに加えて、塩化物イオン濃度を測定する必要があります。中性化深さが必要なのは、中性化と内的塩害がしばしば複合的に生じ、劣化を加速するからです。

図8に塩化物イオン濃度測定のための試料採取の例を示します。コンクリート試料は、φ50mm、長さ150mm程度のコアと呼ばれる円柱を切り出して粉碎するか、φ20mm前後の集塵機能付のドリルで粉碎して、収集します。分析はJIS A 1154の電位差滴定法により行われるのが一般的です。電位差滴定法は、硝酸銀溶液を用いた塩化物イオンの沈殿滴定法です。具体的には硝酸銀溶液を少しずつ加えながら電極電位をモニタし、その変化から化学反応の当量点を見極める手法です。

図9に内的塩害による変状の予測結果を示します。維持



(a)コア法 (b)ドリル法  
図8 塩化物イオン濃度測定のための試料採取の例

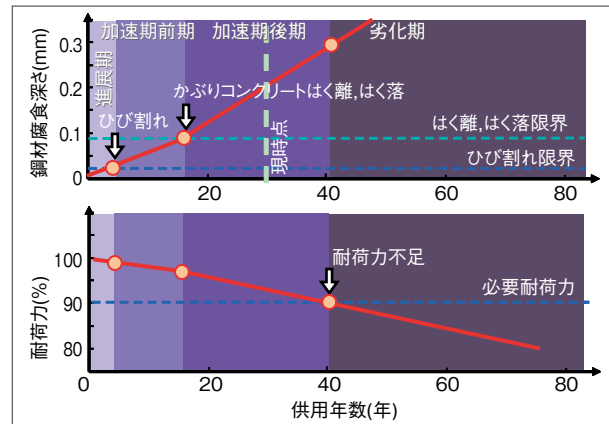


図9 内的塩害による変状の予測結果の例

管理標準で提案されているモデルでは、施工時、つまりコンクリートの練り混ぜ時に限界塩化物イオン濃度 $1.2\text{kg}/\text{m}^3$ を超えると、腐食が始まります。従って内的塩害には潜伏期はありません。鉄筋の腐食速度は、かぶり、塩化物イオン濃度、水とセメントの比率により関数として与えられます。かぶりがはく落し露出した鉄筋の腐食速度は中性化と同じく $8 \times 10^{-3}\text{mm}/\text{年}$ 程度を用います。このようにして平均的なひび割れ、はく離、はく落、耐力の低下時期を予測していくこととなります。

### まとめ

維持管理標準における劣化予測の概要と、計算の事例について紹介致しました。鉄道構造物の維持管理では、まだまだ目視が主役ですが、今後はこうした定量的な評価の機会も増加していくと考えられます。また、維持管理標準に準拠した劣化予測については鉄道総研と(株)ビーエムシーが共同開発した「橋守 性能照査型健全度診断プログラム」を活用すれば効率的に行うことができます。本稿が今後の維持管理業務の一助となれば幸いです。[RRR]

### 文献

- 1) 鉄道総合技術研究所：鉄道構造物等維持管理標準・同解説（構造物編）-コンクリート構造物-，丸善，2006