

コンクリートの劣化と非破壊検査の重要性

Deterioration of Concrete and Importance of Non-Destructive Inspection

魚 本 健 人*

Taketo UOMOTO

1. はじめに

戦後、我国では非常に多くのコンクリート構造物が建設されている。これらの既存コンクリート構造物を維持管理して行くために、一般的には定期的な検査や詳細検査を実施し、その結果に基づき劣化診断を行い、場合によっては補修・補強などの対策が行われている。しかし、多くのコンクリート構造物（特に土木構造物）はその寸法が大きく、検査をするにしても容易ではない。

現在行われている検査の多くは目視検査であることが多く、その情報はどうしてもコンクリート表面に現れた変状の検査にとどまることが多い。しかし、コンクリート中の鉄筋腐食による劣化などではコンクリート表面に兆候が現れてからでは遅いといえることができる。このような場合にはコンクリート内部の状況を直接検査するか、推定することが重要で、非破壊検査でしか対処することができない。

このような状況を踏まえ、本文では特にコンクリート構造物中の鉄筋腐食の検出についてどのように非破壊検査が適用され、今後どのような展開が期待できるかについて記述する。

2. コンクリート中の鉄筋腐食

コンクリートは引張強度が圧縮強度の1/8～1/10であるため、鉄筋コンクリートやPC構造としての構造部材または構造物として必要な引張力を鋼材との複合化で対処している。しかしこの鋼材が腐食し、断面欠損等が生じると構造体としての耐荷力に影響を及ぼすことになり、材料の劣化が直ちに構造体の耐荷力に大きな影響を及ぼすことになる。このため、コンクリート構造材料の劣化のうち特に重要なものはコンクリート中の補強鋼材（鉄筋、PC鋼材）の腐食であるといえることができる。（写真1参照）

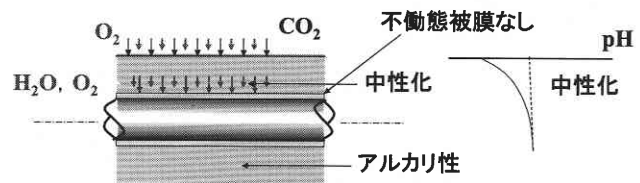
一般的にはコンクリート中では鋼材は腐食しない。アルカリ性の高い（pH 12.5程度）コンクリート中では鋼材表面に緻密な不動態皮膜が形成され、外から供給される酸素や水分が存在しても腐食しにくい状態になっている。事実、

数十年経過した鉄筋コンクリート構造物を調査しても内部の鉄筋が全く腐食していないのが一般的である。しかし、時には内部の鉄筋が著しく腐食している場合が見つかることがあるが、これは次に示す2つの場合に分類することができる。即ち、1) 鉄筋位置までコンクリートが中性化している場合と2) 塩化物イオンがコンクリート中に多量に含まれている場合である。鉄筋等の腐食が生じると補強鋼材の断面減少が生じるばかりでなく、腐食生成物の体積膨張による膨張圧力でコンクリートにひび割れを発生させ、さらに腐食の進行が顕著となる。

一般的な鉄筋コンクリート構造物では、常に1)が生じる可能性がある。即ち、図1に示すようにコンクリート構



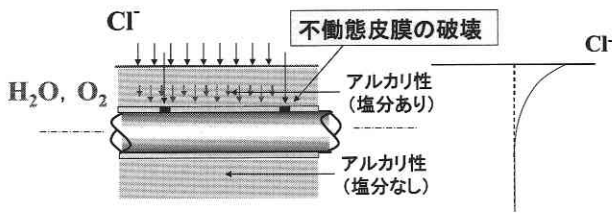
写真1 塩害による鋼材腐食を生じた橋梁上部工



中性化したコンクリートでは不動態被膜が失われ、鋼材は酸素と水が存在すると、腐食しやすくなる。鋼材が腐食すると体積膨張のためコンクリートにひび割れを発生させ、剥離・剥落も生じさせる。

図1 コンクリート中の鉄筋腐食（中性化）

*東京大学生産技術研究所 都市基盤安全工学国際研究センター



塩化物が浸透すると例えコンクリートが中性化していなくても、鋼材表面の不動態皮膜が破壊され、腐食しやすくなる。

図2 コンクリート中の鉄筋腐食(塩化物イオン)

造物が大気中にある場合、大気中の炭酸ガスがコンクリート中のアルカリと反応し、徐々に中性化する。コンクリートが中性化すると鉄筋表面の不動態皮膜が消滅するため、酸素と水分の存在によって容易に腐食する。

2) に関しては2通りの場合がある。1つは海砂などの海産骨材を使用した場合で、清浄な水で十分な洗浄が行われないと、打設するコンクリート中にかなりの量の塩化物イオンが混入することになる。土木学会「コンクリート標準示方書」では、NaCl換算で0.04%以下、コンクリートの許容最大塩化物含有量として0.30 kg/m³以下であることが要求されているが、未洗浄の骨材を使用するとこの2~10倍の塩化物が混入する恐れがある。大量の塩化物がコンクリート中に混入している構造物も存在するが、このような構造物では脱塩工法等の特別な対策を施す必要があるといえよう。もう1つは図2に示すように、海岸・沿岸構造物のように海から塩化物イオンが供給される場合である。この場合にはコンクリートに供給される塩化物量に限度がなく、通常の方法では対処できない。新規構造物の場合には土木学会規準に適合するエポキシ樹脂塗装鉄筋を使用する(関西空港など)、PIC等の埋設型枠を表層部に設置する(本州四国連絡橋など)などの方法で対処することができるが、既設構造物の場合には難しい。現在、既存構造物に採用されている方法としては劣化の程度に応じて表面処理、電気防食などがあるが、前者は補修しても劣化を防止できない場合があり、後者の場合には専門的な技術や維持費がかかるという欠点がある。

3. コンクリート中の鉄筋腐食の非破壊検査

このようなコンクリート中の鉄筋腐食を検出する非破壊検査方法としては自然電位の測定、コンクリートの比抵抗の計測などがある。一般的に行われているのは前者の方法で、表1に示すように米国のASTMでは自然電位の測定値(銀-塩化銀電極)がどのような値になるかで内部鉄筋の腐食程度を予測する方法が採用されている。

しかし、この方法では測定時の全体的な鉄筋の腐食傾向

表1 ASTMによる判定方法

自然電位 (E)	腐食確率
-80mV < E	腐食していない (90%)
-230mV < E < -80mV	不明
E < -230mV	腐食している (90%)

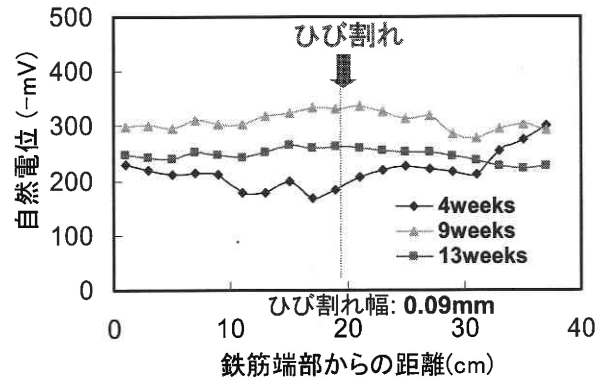


図3 鉄筋コンクリート試験梁の自然電位¹⁾

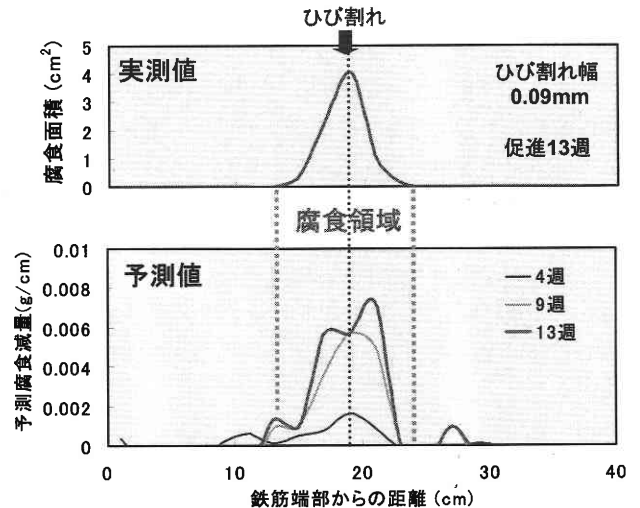


図4 鉄筋コンクリート試験梁中の鉄筋腐食実測値と予測値¹⁾

はわかるものの、どこにどの程度の腐食が生じているかを調べる事ができない。また、今までどこがどの程度腐食してきたかや今後どのようになるかを予測することが難しい。そこで、このように計測した自然電位の測定結果を元にしてどこにどの程度の腐食が生じているかを予測する手法について検討がなされた。元大学院生の塚原絵万氏は図3に示すような測定結果を元に、オームの法則を用いて腐食電流量を求め、さらにファラデーの法則を利用して積算電流量から腐食量を推定する方法を考案した¹⁾。この方法で正確に腐食量を推定するためには時々刻々の自然電位や

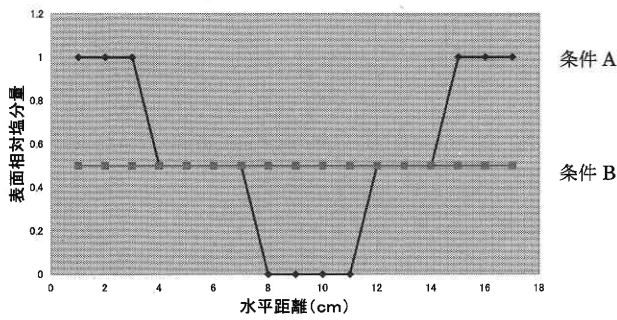


図5 表面塩化物イオン量が異なる2種類の境界条件(条件AとB)

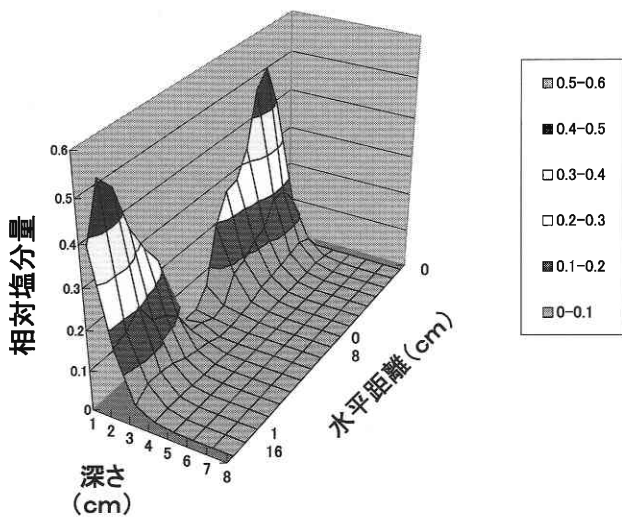


図6 コンクリート表面の塩化物イオン量が条件Aの場合

コンクリートの抵抗値が測定されていることが必要となるが、ここではこれらの値が大きく変化しないと仮定して求めている。その結果を図4に示す。

この図から明らかなように予測値は実測値と同様な傾向が現れており、時間経過とともにどのように腐食が進行したかを知ることができる。このようにある程度の仮定を導入することでコンクリート中の鉄筋がどのように腐食してきたかを予想することが可能である。

4. 新しい鉄筋腐食の予測方法

コンクリートにひび割れ等が発生しない場合には、コンクリート中の鉄筋腐食を予測することははなはだ難しい。特に海風などで運ばれる塩化物イオンが原因となる腐食の場合には、どの程度の塩化物イオンがコンクリート中に浸透しているかがわかれば腐食の可能性を予測することができる。

一般的に、コンクリート中での塩化物イオンの移動は極端な水分の不足がない場合には次式で示す Fick の拡散方

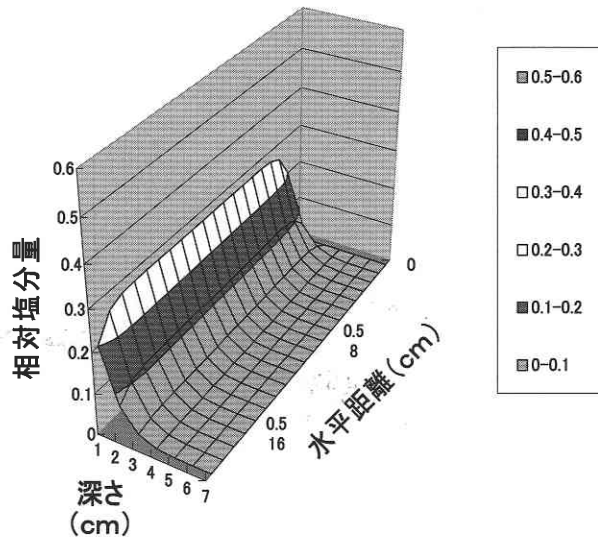


図7 コンクリート表面の塩化物イオン量が条件Bの場合

程式で説明できるとされている。即ち、コンクリート表面のエン分量と拡散係数がわかればこの式を用いて計算することができることになる。

$$C(x,t) = C_0 \left\{ 1 - \operatorname{erf} \left(\frac{x}{2\sqrt{D \cdot t}} \right) \right\}$$

- ただし C_0 : 表面塩分量
- D : 塩分拡散係数
- t : 時間
- x : コンクリート表面からの深さ

現在、広範囲のコンクリート表面の塩化物イオン濃度を計測する方法はない。しかし、現在、大学院生の金田尚志君が開発中の手法²⁾を用いれば計測することが可能となる。この方法をコンクリート構造物に適用した場合、ただ単に塩化物イオン量が多い箇所と少ない箇所を区別するばかりでなく、内部鉄筋の腐食可能性の高い箇所を予測することが可能となる。

図5-図7はコンクリート表面の塩化物量が異なる場合の塩化物イオン量を計算した例である。境界条件としては同じ平均塩化物イオン量 (0.5) ではあるものの場所によって塩化物イオン量が大きく異なる条件Aと均等に塩化物イオン量が分布する条件Bである。

これらの異なった条件で計算すると、コンクリート中の塩化物イオン量は図6および図7のようになる。

これらの計算結果から明らかなように、平均塩化物量が同じであっても場所によって表面の塩分濃度が異なると内部の塩化物イオン量も場所によってかなり異なったものとなる。数十年という長期の場合には平均値で考えても大差

研究速報

は無いと考えられるが、初期の鉄筋腐食（表層部の鉄筋）については著しい影響を受けるといえよう。このような予測を実施するために前述の新しい非破壊検査の開発が重要視されており、今後の開発が期待されているゆえんでもある。

5. おわりに

本文は、これから重要視されるコンクリート構造物の劣化（特にコンクリート中の鉄筋腐食）診断の基本となる非破壊検査にはどのような問題があるかを説明するとともに、この非破壊検査を高度化するためにどのような非破壊検査が必要で、今後どの程度まで高精度化できるかを概説

したものである。今後、都市基盤安全工学国際研究センターではより精度の高い検査手法を開発し、さらに安価でアジア諸国等においても適用可能な方法を開発していく予定である。

(2004年4月6日受理)

参考文献

- 1) 塚原絵万：マクロ的アプローチによるひび割れを有するコンクリートの物質移動評価，東京大学学位請求論文，2002年3月
- 2) 金田尚志：東京大学博士中間審査資料，2003年6月