

コンクリート中鉄筋の腐食診断技術

土 井 康太郎*

1. はじめに

高速道路や鉄道高架橋などの大型で高耐荷重が要求される構造物には主に鉄筋コンクリートが使用される。我が国では1950年代から1970年代までに高度経済成長期を迎え、特に1964年の東京オリンピックに合わせて多数のコンクリート構造物が建設された。それから50年以上経過した現在、コンクリートの剥離や崩落などの事故がしばしば報告され、これらの構造物の多くが、補修・更新を必要としている⁽¹⁾⁻⁽⁵⁾。

国土交通省の調査によると、2010年頃より建設後50年を迎えるコンクリート構造物の全体に占める割合が急激に上昇し、例えば橋梁数に着目すると図1に示すとおり、2018年には橋梁全体の25%が建設後50年を迎え、2023年には全体の43%が、2033年には全体の約67%が老朽化した構造物になると報告されている⁽⁶⁾。一方で我が国の総人口推移に着

目すると、図2に示すとおり、2020年には1億2千万人を超える人口がその後わずか50年の間に30%減少し2065年には9000万人を割ると試算されている⁽⁷⁾。このことから、老朽化のため早急に補修・更新を必要とするコンクリート構造物の数は年々増加していくのに対し、維持管理を行う人の数は減っていくことが予想される。このような現状にあって、高精度で高効率、簡便なコンクリート劣化診断技術の開発と実用化が強く望まれている。コンクリートの劣化診断を行い、適切な補修・保全を行うことは、人々の安全な暮らしを守るのみならず、インフラ構造物にかかるトータルコストを削減することにも繋がる。本稿では、コンクリート劣化診断技術のうち、コンクリートの劣化に最も重大な影響を及ぼす鉄筋腐食に焦点を当て、実用化済みあるいは実用化目前のコンクリート中鉄筋腐食診断技術について紹介する。

2. コンクリート劣化の原因

(1) コンクリート中鉄筋のおかれる環境

コンクリートはセメントペーストと骨材により構成され

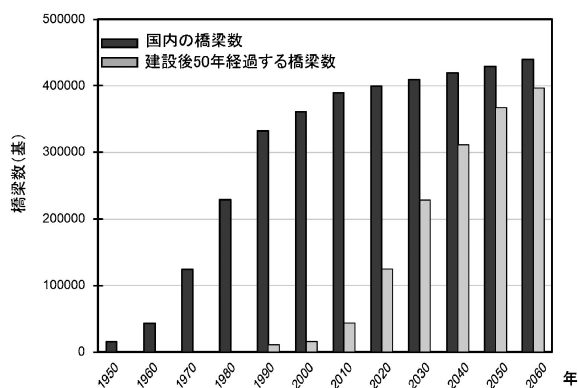


図1 日本の総橋梁数の推移予測。
(国土交通省のデータをもとに作成⁽⁶⁾。2020年以降の橋梁数はデータが存在しないため、2010年から2020年にかけての橋梁数の増加と同様の増加をたどると仮定してグラフの作成を行った。)

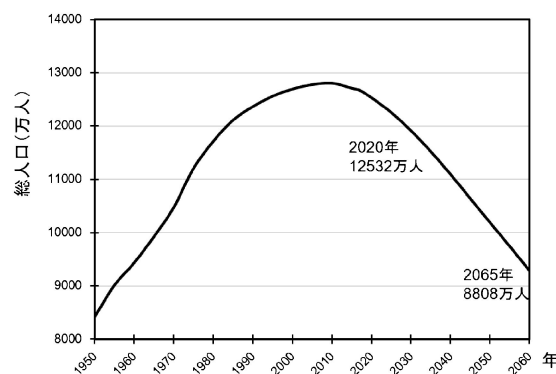


図2 日本の総人口の推移予測。
(総務省統計局のデータをもとに作成⁽⁷⁾)

* 物質・材料研究機構 構造材料研究拠点; 独立研究者(〒305-0047 つくば市千現 1-2-1)
Diagnostic Technique for Corrosion of Reinforcing Steel Inside Concrete; Kotaro Doi (Independent Scientist, Research Center for Structural Materials, National Institute for Materials Science, Tsukuba)
Keywords: corrosion, reinforcing steel, concrete, infrastructure, diagnostic technique, electrochemical methods, electromagnetic methods
2020年1月21日受理[doi:10.2320/materia.59.313]

る。セメントペーストはセメント粉と水を練り混ぜたものである。また、骨材とは、コンクリートおよびモルタルを作る際にセメントペーストに混ぜて使用される砂利や砂のことである。骨材はその大きさにより細骨材と粗骨材に分類され、セメントペーストに細骨材を混ぜたものをモルタルと、モルタルに粗骨材を混ぜたものをコンクリートと呼ぶ。コンクリート中では骨材全体でコンクリートの体積の約7割を占めており、コンクリート中に鉄筋を埋設することで鉄筋コンクリートが完成する。コンクリートに埋設される鉄筋は、各国の工業規格によりその規格が決められている。日本では日本工業規格(JIS)により鉄筋コンクリート用異形棒鋼(JISG3112)として定められており、強度のみの規定が存在する(組成に関する規定はない)。強度の種類別にSD295A, SD295B, SD345, SD390, SD490の5種類が存在し、各鋼種記号の先頭のSDはSteel Deformed bar すなわち異径鉄筋であることを意味する。その後の数字はそれぞれ降伏強度あるいは0.2%耐力(MPa)を表しており、SD295Aでは295 MPa以上、SD295Bでは295-390 MPa, SD345では345-440 MPa, SD390では390-510 MPa, SD490では490-625 MPaの強度でなければならない。コンクリートは圧縮に強く鉄筋は引張に強いため、両者を組み合わせることで頑強で大荷重に耐えうる構造物を建設できる。

図3にコンクリート、鉄筋とその周囲環境の模式図を示す。コンクリート内部はセメントペーストに含まれる水酸化カルシウム($\text{Ca}(\text{OH})_2$)が飽和したpH12.5程度の高アルカリ環境である。このような環境では、埋設された鉄筋表面には保護性の高い酸化皮膜である不働態皮膜が生成するため、鉄筋は良好な耐食性を維持できる。しかし、種々の腐食因子により不働態皮膜は破壊され鉄筋腐食が進行する。

コンクリート中铁筋の腐食は不働態皮膜の破壊により生じる。不働態皮膜が破壊されると、新生面上で鉄の溶解(アノード反応)が生じ、同時にアノード反応で生成した電子を消費するため酸素還元(カソード反応)が生じる。溶解した鉄イオンは水や酸素、水酸化物イオンと結合し腐食生成物である鉄さびが形成する。鉄さびの膨張によりコンクリートの内部

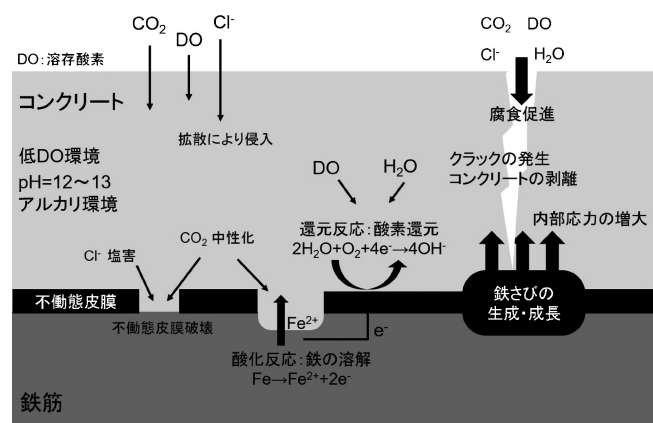


図3 コンクリート内の環境および鉄筋腐食メカニズムの概要。

応力が高まりひび割れが発生し最終的には剥離・崩落に至る(図4)。すなわち、コンクリートの劣化は不働態皮膜の破壊とその後の鉄筋腐食に起因すると言える。不働態皮膜を破壊する要因として、塩化物イオン(Cl^-)と二酸化炭素(CO_2)が挙げられ、 Cl^- を要因とするコンクリートの劣化を塩害と、 CO_2 を要因とするコンクリートの劣化を中性化と呼ぶ。その他にもコンクリート劣化因子として凍害やアルカリシリカ反応が挙げられるが、本稿では特に鉄筋腐食に影響を及ぼす塩害と中性化について概説する。

(2) 塩害

塩害による腐食は、コンクリート内部へ侵入した Cl^- が鉄筋表面の不働態皮膜を破壊することにより生じる。 Cl^- の侵入の主たる原因として海水や雨水からの飛来塩分が挙げられるが、骨材への海砂の使用や、寒冷地で道路面の凍結を防止するために散布する凍結防止剤も原因として挙げられる。ただし、 Cl^- が鉄筋表面に到達してすぐに不働態皮膜破壊が生じるわけではない。不働態皮膜を破壊する Cl^- 濃度(腐食発生限界塩化物イオン濃度)は一般的にはコンクリートの単位体積当たりに占める重量で表され、 1.2 kg/m^3 が採用されることが多かった。しかし、近年、腐食発生限界塩化物イオン濃度は水セメント比やセメント骨材比、セメント粉の種類などに大きく影響を受けることが明らかになり、現在の示方書ではセメントの種類ごとに水セメント比の関数として与えられることが定められた。これによると、ほとんどの場合腐食発生限界塩化物イオン濃度は $1.2 \sim 2.4 \text{ kg/m}^3$ となることが示されている⁽⁸⁾。海砂などの海産骨材を使用する場合、清浄な水で十分な洗浄を行う必要がある。塩害防止のため、コンクリートのかぶり(鉄筋からコンクリート表面までの距離)を厚くしたり、コンクリートや鉄筋表面に塗装を施すなどの



図4 鉄筋の腐食により劣化したコンクリート柱。コンクリートが剥がれ腐食した鉄筋がむき出しになっている(2016年長崎県端島(通称、軍艦島)にて撮影)。

対策がとられており、例えば関西国際空港などではエポキシ樹脂塗装鉄筋を使用する、本州四国連絡橋などではポリマー含浸コンクリート (PIC, Polymer Impregnated Concrete) 等の埋設型枠を表層部に設置するなどの対策がとられている⁽⁹⁾。しかし、これらの対策は新設の構造物に対してのみ可能であるため、既存の構造物に対しては劣化の程度に応じて表面処理や電気防食が行われている。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必要となるため、抜本的な解決には至っていない。

(3) 中性化

コンクリート内部は高アルカリ環境であるが、大気中の CO_2 がセメントペースト中の $\text{Ca}(\text{OH})_2$ と反応し炭酸カルシウム (CaCO_3) を生成することで pH が低下する。この現象を中性化と呼ぶ。鉄筋表面の pH が10程度まで低下すると不働態皮膜を維持できないことが知られており、さらにその後の不働態皮膜の自己再生 (再不働態化) も妨げられるため、腐食は促進される。 CO_2 はコンクリート中の細孔を通して侵入するため、水セメント比の大きいコンクリートほど細孔が大きくなり中性化は進行しやすくなる。また、温度が高く湿度が50～60%の時に中性化進行速度は最大になることが明らかになっている。中性化への対策として、塩害同様にコンクリートのかぶりを厚くしたり、コンクリートや鉄筋表面へのコーティングが実施されている。

3. コンクリート中鉄筋腐食の診断技術

上述の通り、コンクリートに埋設された鉄筋が腐食することでコンクリートは劣化する。しかし、コンクリートは不透明であるため中の鉄筋が腐食しているかどうかは直接観察できない。最も基本的な方法として、目視によりコンクリート表面のひび割れを確認し、そこから内部の鉄筋の腐食程度を推定する方法がとられる⁽¹⁰⁾。この方法では、短時間の内にコンクリートおよび内部の鉄筋の劣化の概要を把握できる。しかし、ここで得られる情報はあくまで概略的なものであり、目視を行う作業者の経験や勘により測定結果が大いに变化するおそれがある。そこで、より詳細にコンクリートの劣化および内部鉄筋の腐食具合を判断するため、各種電気化学測定や電磁波が利用されている。

(1) 自然電位測定

自然電位測定はコンクリート中の鉄筋腐食を診断する技術として最も一般的に用いられる電気化学的手法である。自然電位を測定する際には、図5に示すように脱脂綿やスポンジなどに水を含ませコンクリート表面に当てた後、その上に照合電極を設置し照合電極と鉄筋の電位差を測定する。この際、コンクリートのかぶりを剥がして鉄筋に直接端子を接続する必要がある。アメリカ材料試験協会 (ASTM, American Society for Testing and Materials 現在は ASTM インターナショナルに改名) および土木学会規準としても測定方法が定

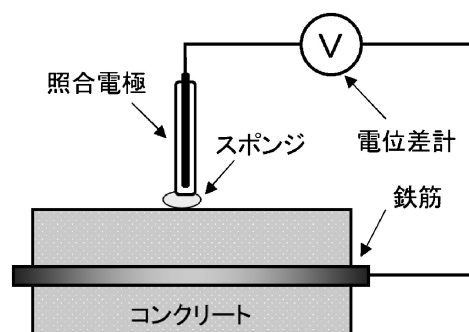


図5 コンクリート中鉄筋の自然電位測定の模式図。

表1 ASTM の自然電位による腐食評価基準⁽¹¹⁾。

飽和塩化銀電極 (Ag/AgCl) を使用した場合	
自然電位 (E, mV)	腐食確率
$-80 \text{ mV} < E$	90%以上の確率で腐食なし
$-230 \text{ mV} < E < -80 \text{ mV}$	不確定
$E < -230 \text{ mV}$	90%以上の確率で腐食あり

められており、例えば ASTM では表1に示すような自然電位による腐食評価基準が定められている⁽¹¹⁾。強アルカリを示すコンクリート中では健全な鉄筋であれば表面に不働態皮膜を形成し腐食から守られるため、おおよそ $0 \sim -100 \text{ mV}$ (vs. Ag/AgCl) の自然電位を示すが、腐食が生じ、鉄が鉄イオンに変化する際に自然電位は卑化する。すなわち、自然電位法により卑化した電位が測定されれば、コンクリート中の鉄筋は高確率で腐食していることになる。しかし、表1に示した通り、自然電位測定から得られる情報は定性的なものであり測定時点で腐食が生じているかどうかを判断するに留まる。また、鉄筋のどこに腐食が生じているかを知ることにはできない⁽¹²⁾。そこで、自然電位の測定結果をもとに腐食の場所と程度を予測する手法が検討されている。塚原らは、鉄筋の場所ごとの自然電位測定を行い、オームの法則より求めた腐食電流量とファラデーの法則から求めた積算電流量から図6に示すような腐食量を推定する方法を考案した⁽¹³⁾。本方法にて求められた腐食箇所と腐食量の予測値は実測値と同様の傾向を示しており、内部が不可視のコンクリート中鉄筋腐食量の推定に期待が持てる。しかし、本手法では時間ごとに变化する自然電位やコンクリートの抵抗値を測定し続ける必要があるため、膨大な量のコンクリート構造物への適用が難しい。

また、コンクリート中鉄筋特有の課題として、鉄筋と照合電極の間にあるコンクリート (かぶり) の性状によって測定結果が大きく変化することが挙げられる。コンクリートの含水率や塩化物イオン量などの要因により、最大 200 mV 程度の電位差が生じることが報告されている⁽¹⁴⁾。

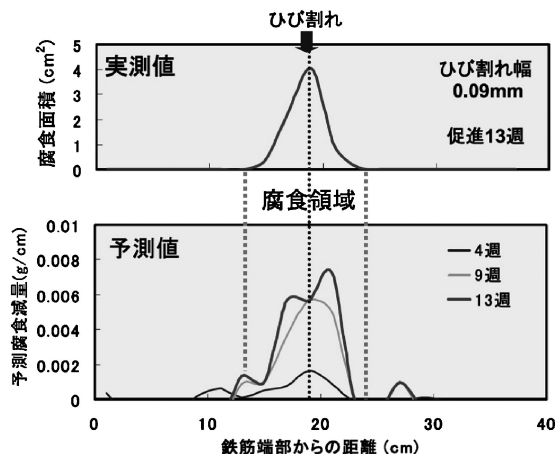


図6 鉄筋コンクリート試験梁中の鉄筋腐食実測値と予測値⁽⁹⁾⁽¹²⁾.

(2) 電気化学的インピーダンス法を用いた分極抵抗測定

図3で述べた通り、コンクリート中の鉄筋表面で腐食が生じると、鉄の溶解反応であるアノード反応とその際に生じた電子を消費するための酸素還元反応(カソード反応)が必ず同時に生じる。この電子の流れが腐食電流であり、鉄筋の腐食速度を表す指標となる。ここで、鉄筋に微小な電位差を付与すると微小な電流が得られ、式(1)、式(2)に示すような付与した電位差と腐食電流、分極抵抗の関係が得られる。

$$\Delta E = \Delta I \cdot R_p \quad (1)$$

$$I_{\text{corr}} = K \cdot \Delta I / \Delta E = K / R_p \quad (2)$$

ただし、 ΔE : 付与した電位差(V)、 ΔI : 得られた微小電流(A/m²)、 R_p : 分極抵抗($\Omega \cdot \text{m}^2$)、 I_{corr} : 腐食電流(A/m²)、 K : 材料固有の係数(V)

このように、分極抵抗と腐食電流の関係から腐食電流を推定する手法が分極抵抗法である。腐食電流の単位に着目すると、クーロン量と時間の単位を含んでいることがわかる。すなわち、分極抵抗法は自然電位測定と異なり、鉄筋の腐食速度を定量的に評価することができる。

分極抵抗を求める手法として、交流インピーダンス法が一般的に用いられる。交流インピーダンス法では、コンクリートの溶液抵抗 R_s と鉄筋/コンクリート界面の電気二重層の容量成分 C_{dl} と分極抵抗 R_p を含んだ図7のような等価回路を考える。このような等価回路が形成されるコンクリート中の鉄筋表面に高周波の交流電圧を印可すると、容量成分 C_{dl} が充電され、電流は $C_{dl} - R_s$ の経路を通る。一方で、低周波の交流電圧を印可すると、電流は $R_p - R_s$ の経路を通る。よって、印可する電圧の周波数を変化させることで、周波数とインピーダンスの関係が得られ分極抵抗とコンクリートの溶液抵抗を求めることができる。この際、印可する電圧が微小であるので鉄筋にダメージを与えにくいというのも交流インピーダンス法の特徴である。通常、コンクリート内の鉄筋を用いて交流インピーダンス法を行う場合、鉄筋に加えて照合電極と対極が必要である(3電極式)。さらに、鉄筋にリード線

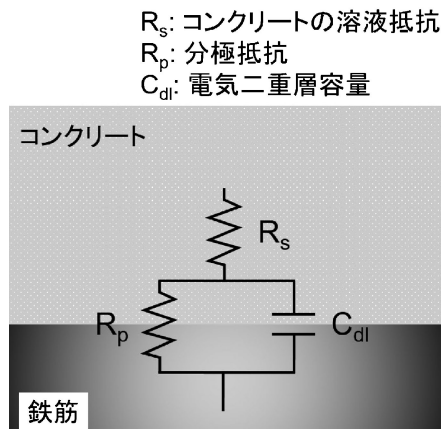


図7 鉄筋をコンクリート内に埋設した際の等価回路。

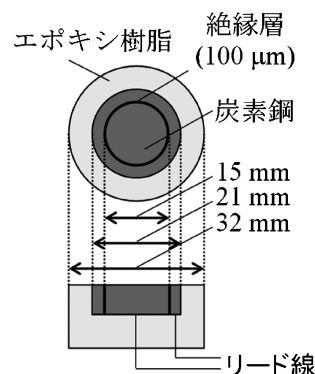


図8 同心円型大気腐食モニタリングセンサ模式図。

をつなげるためにコンクリートのかぶりを剥がす必要があり、コンクリートへの損傷を避けられない。そこで最近では、一対の鋼板からなるプローブ電極を用いて、コンクリート内の環境の把握および鉄筋の腐食状況の推定を行う研究が進められている。プローブ電極を用いることで、(1)電解液を必要とする照合電極を用いない(電極のうち一つが照合電極と対極を兼ねる)ため、電極の扱いが容易で常設可能である、(2)コンクリートのかぶりによるIRドロップなどの影響を受けにくい、(3)電極の表面積が既知であるため単位面積当たりの R_p を求めることができる、(4)鉄筋にリード線を接続する必要がないため、コンクリートへのダメージを最小限に抑えられる、(5)得られた溶液抵抗から、中性化や塩化物イオン進入の進行過程がわかるなど、現場での活用・実用化を見据えた利点が存在する。

著者らは、図8に示すような一対のプローブ電極を有する同心円型大気腐食モニタリングセンサ(以下、腐食センサ)を用いて、模擬コンクリート溶液中の環境モニタリングを行った。この際、プローブ電極の素材は、鉄筋として広く使用されるSD345鋼とした。これまでインピーダンス測定には1対の平板電極を使用するのが一般的であったが⁽¹⁵⁾、本研究では2電極を同心円状に配置することにより、電極形状の異方性がなくなり、より精度良く測定を行うことが可能とな

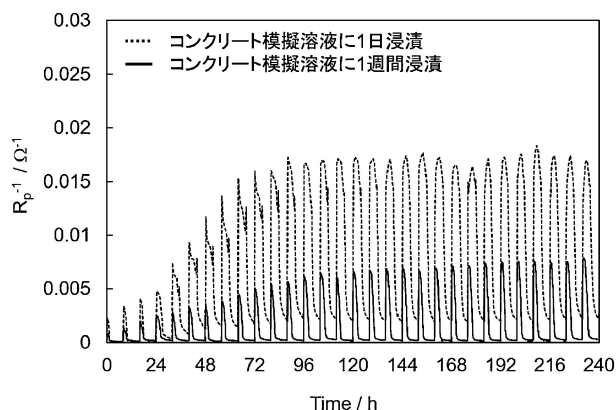


図9 飽和 $\text{Ca}(\text{OH})_2$ 溶液中に1日または1週間浸漬した腐食センサの乾湿繰返し試験中における分極抵抗変化⁽¹⁷⁾.

った⁽¹⁶⁾. この腐食センサを予めコンクリート内を模擬した飽和 $\text{Ca}(\text{OH})_2$ 溶液中に1日または1週間浸漬し表面を不働態化させた後、乾湿繰返し試験に供することで、不働態化時間が塩化物イオンによる不働態皮膜破壊に及ぼす影響を検討した. 乾燥過程は7時間58分とし、湿潤過程では0.1 MのNaCl溶液へ腐食センサを2分間浸漬した. 図9に飽和 $\text{Ca}(\text{OH})_2$ 溶液中に1日または1週間浸漬した腐食センサの乾湿繰返し試験中における分極抵抗変化を示す. 縦軸には分極抵抗の逆数をとっており、より値が大きいほど腐食速度が大きいことを意味する. 1週間浸漬した腐食センサの腐食速度の変化幅の方が1日浸漬した腐食センサの腐食速度の変化幅よりも小さいことから、不働態化時間が長いほど不働態皮膜はより安定となり、高い耐食性を発揮することが明らかとなった⁽¹⁷⁾. このことは、実環境において鉄筋への塩化物イオンの到達が遅いほど鉄筋の耐食性が向上することを意味しており、新設および既設のコンクリート構造物からいかに塩化物イオンを取り除くことが重要であるかが分かる.

時枝らは、コンクリート供試体に図10に示すようなSD345鋼を素材としたプローブ電極を埋設し、プローブ電極が実構造物の劣化診断技術として適用可能かどうかの検討を行った⁽¹⁸⁾. コンクリートにプローブ電極を埋設する際には、水溶液を用いた実験とは異なりプローブ電極表面をコンクリートに密着させる工夫が必要となる. そこで本研究では、円筒型と円錐台形の二つの部材を組み合わせ、ドリルでコンクリートを削孔した穴の底部に円筒型の部材を設置し、リード線を接続した円錐台形の部材を後から打ち込むことで、円筒型の部材が広がりながらコンクリートに密着するプローブ電極を作製し使用した. 図11に示したように、プローブ電極を供試体のコンクリートから2 mm, 5 mm, 10 mmの深さに設置した後、3%のNaCl水溶液で満たされた水槽内にコンクリート供試体を静置し電気化学的インピーダンス測定を行った. その結果、図12に示すように、プローブ電極を設置する深さが浅いと分極抵抗は小さくなる、すなわち、コンクリートのかぶりが多いほど中の鉄筋表面の不働態皮膜

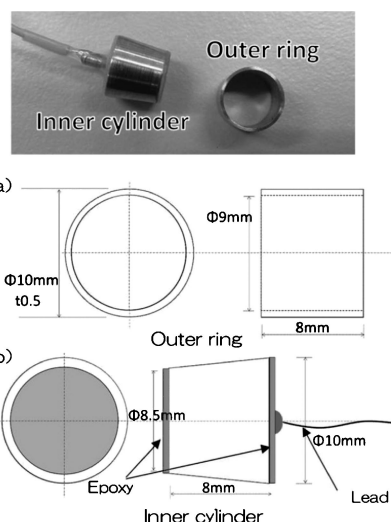


図10 SD345鋼を素材としたプローブ電極⁽¹⁸⁾.

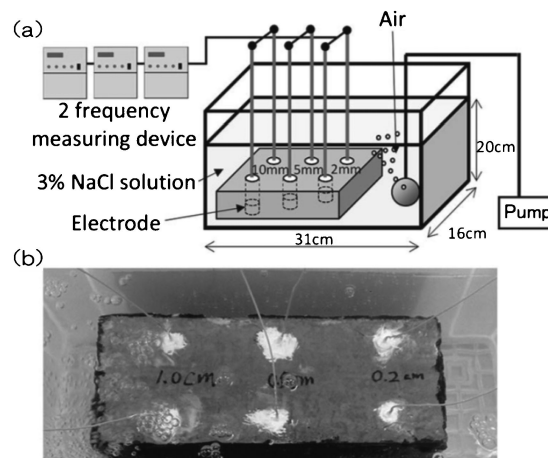


図11 プローブ電極を埋設したコンクリート供試体を用いた腐食試験: (a)腐食試験概略図, (b)コンクリート供試体外観写真⁽¹⁸⁾.

は安定であることを見出した. また、高pH環境で塩化物イオンによって不均一に不働態皮膜が破壊された電極の分極抵抗は、不働態皮膜が完全に消失した場合の分極抵抗と比較して、約30~50倍大きいことや、塩化物イオンの影響がなければコンクリート内のpHが高いほど分極抵抗が高いことを見出した. pHやコンクリートのかぶりと鉄筋の耐食性の関係を明らかにしたことにより、環境データがわかれば既存のコンクリート構造物の劣化状況がある程度推測できることになる. このようなプローブ電極の1日でも早い実用化が望まれる.

(3) 電磁波法を用いた鉄筋腐食診断

これまでに紹介した自然電位測定および分極抵抗測定では、その程度に大小の差はあれど、コンクリートへのダメージは避けられない. 自然電位法では目的の鉄筋にリード線を繋ぐため、コンクリートのかぶりを剥がす必要があり、プロ

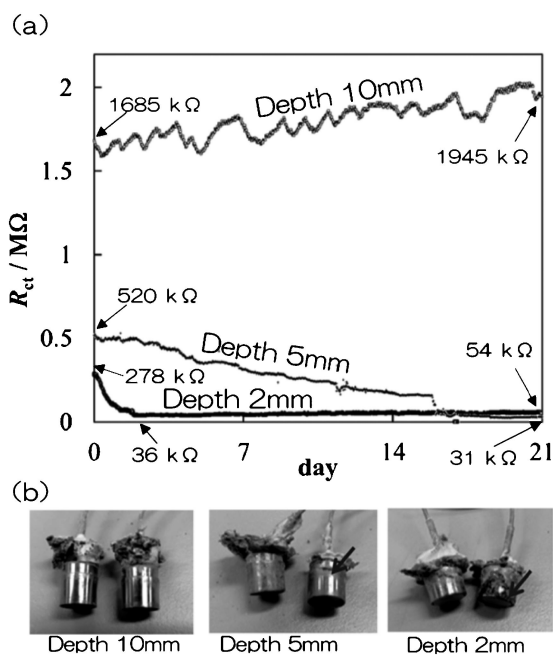


図12 インピーダンス測定結果：(a)腐食試験中におけるプローブ電極の分極抵抗変化，(b)腐食試験後のプローブ電極外観写真⁽¹⁸⁾。

ープ電極を使用したコンクリート内環境モニタリングでもプローブ電極を埋め込むための小さな孔を空ける必要がある。そこで完全非破壊で内部鉄筋の腐食を診断するため、電磁波による測定手法の検討および実用化が進められている。

電磁波法は電磁波をコンクリート表面から内部へ向けて放射し、透過信号または反射信号を測定することによりコンクリート内の情報を引き出す方法である。使用する波によって、(a)電磁誘導法や(b)X線法、(c)レーダー法、(d)赤外線法などに分類される⁽¹⁹⁾。

(a) 電磁誘導法：コイルに交流電流を流した際に発生する交流磁束を用いる方法である。交流磁束が鉄筋に到達した際に発生する逆方向の磁束を検出することで鉄筋の位置を調査する。ハンディタイプのものとしてすでに実用化されているが、あくまで鉄筋の位置を知るためのもので鉄筋の腐食程度を把握することはできなかった。しかし、何らはすでに報告されていた電磁波による鉄筋径とかぶりの測定手法⁽²⁰⁾を改良し、鉄筋の腐食程度を測定する手法を考案した。本手法では、図13に示すような励起コイルと検出コイル、ロックインアンプからなるスキャナーとノートPCのみで構成された小型の検出装置を用い、コンクリート表面にスキャナーを走査することで交流磁束に対する電磁応答を計測する。4.2 kHzの励起波を用いることにより、最大140 mm程度のかぶりでも鉄筋の位置を測定できる⁽²¹⁾⁽²²⁾。さらに、励起波の周波数を80 kHzに変更し、ロックインアンプで得られる励起波と同位相のXシグナルと90度位相の異なるYシグナルの比を解析する事で鉄筋の腐食程度を判別することが可能となった(図14)⁽²³⁾。これは、鉄筋上に生成した鉄さびが鉄筋とは異なる電気伝導度や透磁率を有する性質を利用したものであ

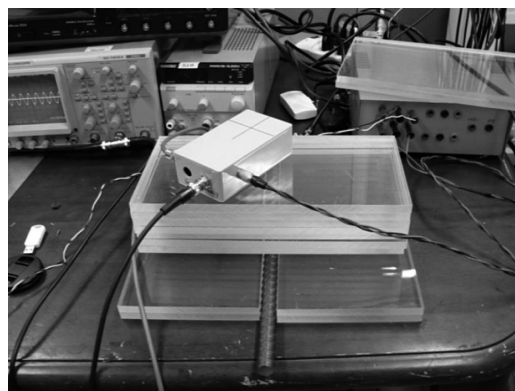


図13 コンクリートを模擬したアクリル板に挟んだ鉄筋とスキャナー⁽²¹⁾。

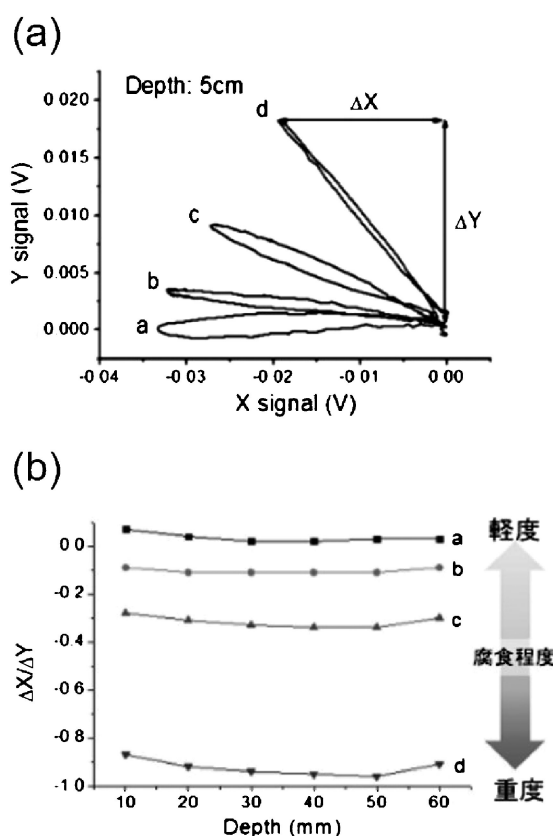


図14 電磁波を用いた鉄筋腐食診断技術：(a)ロックインアンプで得られる励起波と同位相のXシグナルおよび90度位相の異なるYシグナル、(b)異なるかぶりにおける種々の鉄筋の $\Delta Y/\Delta X$ 値⁽²³⁾。

る。電磁波を用いた手法はコンクリートかぶりを除去して鉄筋にリード線を接続することなく非破壊で内部の鉄筋の状態を予測できるため、すでに腐食が進行した鉄筋のみならず、ひび割れを生じていない健全～腐食初期のコンクリート構造物にも適用できると考えられる。

(b) X線法：X線をコンクリート中を透過させ、その強度分布からコンクリート、鉄筋、コンクリートの空隙やひび割れを検出できる。図15に示すように、視覚的にコンクリー

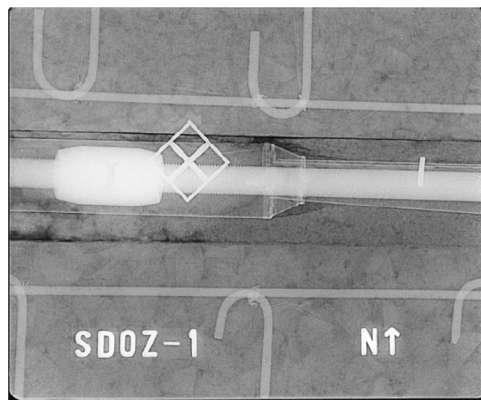


図15 X線法による撮影結果例⁽²⁴⁾。

ト構造物の内部を捉えられるため、コンクリートおよび鉄筋の劣化状態をイメージしやすい⁽²⁴⁾。しかし、測定対象とするコンクリートにある程度(約 500 mm 以下)の薄さが要求される、片面からのみの測定ができない、放射線を使用するため、安全面に問題があるなど使用する上での課題が多い。

(c) レーダー法：レーダー法では、送信側から放射した電磁波が鉄筋やコンクリートの空隙、ひび割れの境界面で反射され、それを受信側で受けとることによりコンクリート内部の情報を得ることができる。電磁波を放射してから受信するまでの時間を測定することでコンクリート内部の鉄筋や空隙の深さ情報が得られ、受信アンテナの位置を変えることにより鉄筋や空隙の位置情報が得られる。コンクリートと鉄筋や空隙の比誘電率が異なることを利用した測定法である。乾燥コンクリートの比誘電率は一般的には 4~12、湿潤コンクリートの比誘電率は 8~20 と言われているが、海洋構造物の表面などでは濡れにより比誘電率が大きく変化するため、測定が困難となる。また、鉄筋が密に埋設されている場合、反射波が受信側に届きづらくなるため測定が困難になるなど課題も存在する。

(d) 赤外線法：コンクリート表面およびその内部は一樣な構造ではなく、コンクリート中にひび割れや空隙等が存在するとその部分の熱伝導率が異なるため温度に差異が生じる。赤外線法はその温度の差異を放射温度計を用いて検知する手法である⁽²⁵⁾。屋外では太陽光による温度差が生じるが、屋内では何らかの温度変化を与える必要がある。本手法は、非接触で広範囲を測定できるメリットを持つが、検査深度が小さく、コンクリート表面の汚れや日照の程度、コンクリートの箇所による部材厚の違いなどにより測定精度に大きな差が生じる。林らは、赤外線法の検出精度向上のため、コンクリートの損傷領域を強調させる画像フィルター処理を行い、温度変化部の損傷予測確率を推計する統計解析手法の検討を行った。その結果、画像フィルター処理によりコンクリート表面から斜めに進展する剥離ひび割れの深さも定量的に判断できること、損傷予測確率を危険度評価の指標として用いることで、より細かく定量的なコンクリートの損傷判定が可能となることを示した⁽²⁶⁾。赤外線法は基本的にはコンクリー

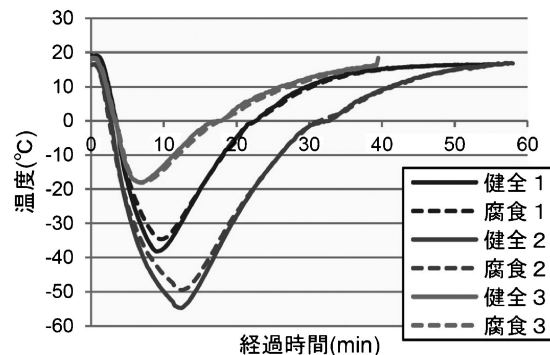


図16 健全な鉄筋および腐食した鉄筋の温度変化⁽²⁶⁾。

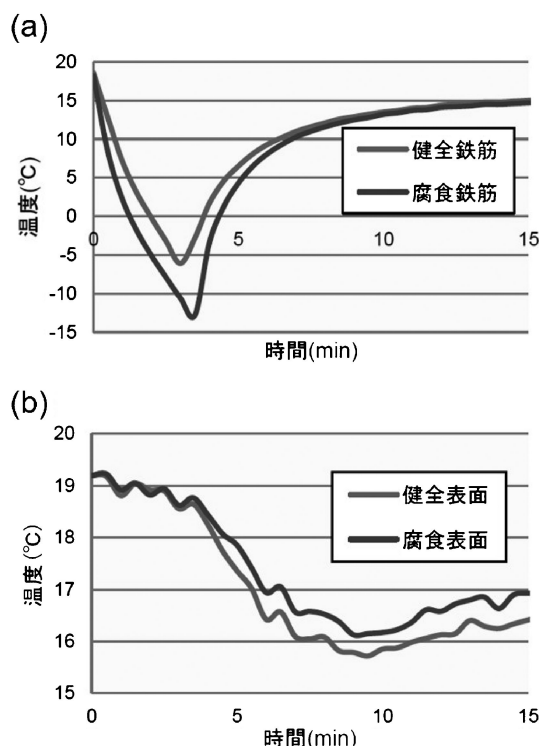


図17 コンクリート供試体に埋設した際の温度変化：
(a)健全な鉄筋および腐食した鉄筋の温度変化、
(b)それぞれの鉄筋を埋設したコンクリート表面の温度変化⁽²⁶⁾。

ト表面の劣化度合いを測定するものであるため、内部鉄筋の腐食の測定には用いない。しかし、高德らは、鉄筋表面の腐食生成物層が健全な鉄筋と比較して小さい熱伝導率を持ち、比熱が大きくなるという特性を利用して、赤外線法をコンクリート内部鉄筋の腐食程度の評価に応用した。液体窒素を用いて腐食した鉄筋と健全な鉄筋を冷却し、両者の経時的な温度変化を測定した。その結果、図16に示すとおり、冷却時間が長くなるにつれ腐食した鉄筋と健全な鉄筋では温度変化に差が現れることが明らかとなった。さらに、図17のように、鉄筋をコンクリートに埋設し、液体窒素を用いてコンクリートごと冷却した試験においても、腐食した鉄筋と健全な鉄筋の間には温度差が生じており、その温度差はコンクリート表

面にも現れるため、実環境のようなコンクリート表面の温度のみが測定対象となる場でも完全に非破壊で内部鉄筋の腐食程度を測定できる可能性を示した。

電磁波を用いた測定法の一番のメリットはコンクリートに損傷を与えることなく比較的広範囲のコンクリート内部情報を得られる点である。これまではコンクリート表面の損傷を測定するのみで内部の情報は鉄筋の位置程度であったが、電磁波による鉄筋腐食測定の研究が進められており、今後の発展が期待できる。

4. お わ り に

コンクリート構造物が使用される環境によってその劣化挙動は大きく変化する。コンクリートを劣化させる重要な因子として、塩害や中性化による鉄筋腐食が挙げられ、その他にもコンクリートそのものを劣化させる因子にアルカリシリカ反応や凍害、化学的浸食や風化、さらにはコンクリートの上を走行する車輛などによる疲労などが挙げられる。これらの劣化因子は単独で作用するのではなく、複合的に作用しコンクリートの寿命を低減させる。すなわち、様々な環境でコンクリートがどのように劣化しているのか、またこれからどのように劣化していくのかを知るための網羅的な診断技術がコンクリートの寿命を決めると言っても過言ではない。この先、コンクリート診断技術は非破壊で簡単かつ迅速に正確な測定および劣化予測が行えるよう進歩していくであろう。また、診断技術のみならず、ロボットやドローン、AIなどを駆使した人的負担を減らすための維持管理手法の開発も進められている。コンクリート構造物に代表されるインフラ構造物は、我々の生活や社会経済活動における道路・鉄道・港湾・空港などを支える基盤であり、老朽化が進むインフラ構造物の維持管理を正しく進めていくことは極めて重要な課題である。新しい技術が実用化されるまでには多くの労力と時間を要するため、本稿で紹介した技術以外にもまだまだ多くのシーズが眠っているであろう。それら新技術が、一日でも早く現場で使用され、我が国のインフラ維持管理技術がますます向上し、人々の安全な生活へ貢献していくことを願っている。

文 献

- (1) 宮川豊章, 保田敬一, 岩城一郎, 横田 弘, 服部篤史: 土木学会論文集 F, **64**(2008), 24-43.
- (2) 魚本健人: コンクリート工学, **39**(2001), 10-13.
- (3) 松村英樹: コンクリート工学, **39**(2001), 8-15.
- (4) 大津政康: 材料, **51**(2002), 405-411.
- (5) 関 博: 土木学会論文集, **557**(1997), 1-14.
- (6) 国土交通省ホームページ「社会資本の老朽化の現状と将来」より.
- (7) 総務省統計局ホームページ「人口推計」より.
- (8) 土木学会: コンクリート標準示方書, (2017).
- (9) 魚本健人: 生産研究, **56**(2004), 183-186.
- (10) 魚本健人: 生産研究, **53**(2001), 587-591.
- (11) ASTM C 87691 (Reapproved 1999): Annual Book of ASTM Standards, **03**(1999), 457-462.
- (12) 小山理恵, 矢島哲司, 魚本健人, 星野富夫: 土木学会論文集, **550**(1996), 13-22.
- (13) 塚原絵万, 魚本健人: コンクリート工学論文集, **11**(2000), 75-84.
- (14) 永山 勝: コンクリート工学, **51**(2013), 194-199.
- (15) 西方 篤, 熊谷草平, 水流 徹: 材料と環境, **43**(1994), 82-88.
- (16) 片山英樹: 表面科学, **36**(2015), 24-28.
- (17) 土井康太郎, 山田茉耶, 星 芳直, 四反田功, 片山英樹, 板垣昌幸: 土木学会論文集 E2(材料・コンクリート構造), **74**(2018), 1-9.
- (18) 時枝寛之, 岡本 樹, 星 芳直, 四反田功, 板垣昌幸: 材料と環境, **66**(2017), 299-304.
- (19) 大即信明, 鎌田敏郎: コンクリート工学, **31**(1993), 5-12.
- (20) 横田理, 土肥 博, 石井勇五郎: 圧力技術, **30**(1992), 215-222.
- (21) D. F. He, M. Shiwa, S. Takaya and K. Tsuchiya: Progress in Electromagnetics Research Symposium (PIERS) Proceedings, (2016), 3954-3956.
- (22) D. F. He, M. Shiwa, S. Takaya and K. Tsuchiya: Electromagnetic Nondestructive Evaluation, **42**(2017), 247-252.
- (23) 何東峰: NIMS ホームページ「インフラ長寿命化・強靱化のための構造材料技術」.
- (24) 森 雅司, 葛目宏和: コンクリート工学, **51**(2013), 278-282.
- (25) 林 詳悟, 橋本和明, 明石行雄: コンクリート工学年次論文集, **35** (2013), 1813-1818.
- (26) 高德 類, 新井淳一, 野嶋潤一郎, 溝渕利明: コンクリート工学年次論文集, **36**(2014), 2032-2037.



土井康太郎

★★★★★★★★★★★★★★★★★★★★
2015年 大阪大学大学院工学研究科博士後期課程修了
同年 物質・材料研究機構 NIMS ポスドク研究員
2016年 物質・材料研究機構 若手国際研究センター (ICYS) ICYS 研究員
2018年11月- 現職
専門分野: 腐食防食, 環境材料学
◎主にコンクリート内部鉄筋の腐食メカニズムの検討
や新腐食加速試験法の開発に従事。
★★★★★★★★★★★★★★★★★★★★