

放射光X線イメージングを用いたコンクリート中鋼材の非破壊観察 Nondestructive Observation of Steel in Concrete Using Synchrotron Radiation X-ray Imaging

西原 克浩^a, 吉住 歩樹^a, 谷山 明^a 梶原堅太郎^b
Katsuhiko Nishihara^a, Ayuki Yoshizumi^a, Akira Taniyama^a, Kentaro Kajiwara^b

^a 日本製鉄(株), ^b(公財)高輝度光科学研究センター
^a Nippon Steel Corp. ^b JASRI

コンクリート中に埋設された 10 mm 角の鋼板に対して鋼板面と平行に X 線を照射した時の X 線 CT 透過像、ならびに同じく埋設された 30 mm 角の鋼板に対して鋼板面から 30° 傾斜させた方向から X 線を照射した時の X 線ラミノグラフィー透過像を測定して、コンクリート/鋼板界面近傍の断面像をそれぞれ 3 次元再構成した。その結果、X 線ラミノグラフィーを用いると、30 mm 角を超える広い範囲のコンクリート中鋼材表面について、腐食進行に伴うコンクリート/鋼材界面の断面像/3 次元形状変化を非破壊観察できることが確認された。

キーワード: コンクリート中鋼材、Zn 系合金めっき鋼板、高エネルギー白色 X 線放射光、X 線イメージング、X 線 CT、X 線ラミノグラフィー、コンクリート/鋼材界面構造

背景と研究目的:

Zn 系合金めっき鋼板は、合金組成や熱処理条件などの組織制御により、高強度化や軽量化など機械特性、加工性や溶接性などの製品性能が改善されてきたが、長期間にわたる耐食性能を維持するためには、Zn 系合金めっき層の腐食生成物(白錆)や基材である冷延鋼板の腐食生成物(赤錆)によるさらなる耐食性の付与が必要となる。一般に、Zn 系合金めっき鋼板の腐食生成物は、Zn や Fe などの金属が軽元素(C, H, O, N や S など)や Cl などと化学結合して、内部には水分や空隙が含まれる。従来、腐食進行に伴う腐食初期における腐食生成物の構造変化については、励起エネルギーによる検出深さの違いを利用した光電子分光[1]、あるいは光電子分光と赤外分光を相補活用することによって[2]、表面から深さ 10 nm 程度、あるいは数 μm 程度における腐食生成物の構造変化から、熔融 Zn-Al 系めっきの腐食反応機構が調べられてきた。また、基材である金属と腐食生成物の密度差を利用して、平板試料の内部構造が画像化される放射光 X 線ラミノグラフィーを用いて、腐食生成物(酸化物や水酸化物などの無機化合物)と金属(Zn 系合金めっきや冷延鋼板)の界面形状を非破壊分析するための試料作製技術、測定技術および X 線透過像の 3 次元再構成技術が検討されてきた[3-4]。

本研究は、コンクリート建造物の構造材料としてコンクリート中に埋設された鋼材表面の腐食状態を非破壊分析する診断技術を確立することが目的であり、将来的には、客先における使用環境がコンクリート中鋼材の腐食状態に及ぼす影響を事前調査して、客先ニーズに適した鋼材を提案/開発/提供する。そこで、本課題は、高エネルギー白色 X 線を用いた X 線イメージング(CT/ラミノグラフィー)を用いて、コンクリート中に埋め込まれた鋼材表面近傍の凹凸形状、空隙や亀裂などを非破壊観察するための試料作製/測定/解析条件を調査することが目的である。

実験:

本課題においては、Zn-11%Al-3%Mg-0.2%Si めっき鋼板をコンクリート片に埋め込んだ後、鋼板のコンクリート片から出ている面以外を樹脂テープで被覆して、塩水噴霧(35°C-5 wt%NaCl 水溶液×2 時間噴霧)、乾燥(大気中 60°C-湿度 20~30%×4 時間曝露)および湿潤(大気中 50°C-湿度 95%以上×2 時間曝露)を 60 回繰り返す複合サイクル腐食試験(JASO M609/610) 60 サイクルを実施した(図 1a)。そして、腐食試験後のコンクリート片から、鋼板面が上下面と平行になるように CT 用(10 mm 角×高さ 50 mm、図 1b)ならびにラミノグラフィー用(30 mm 角×高さ 50 mm、図 1c)の試験片をそれぞれ切り出した。

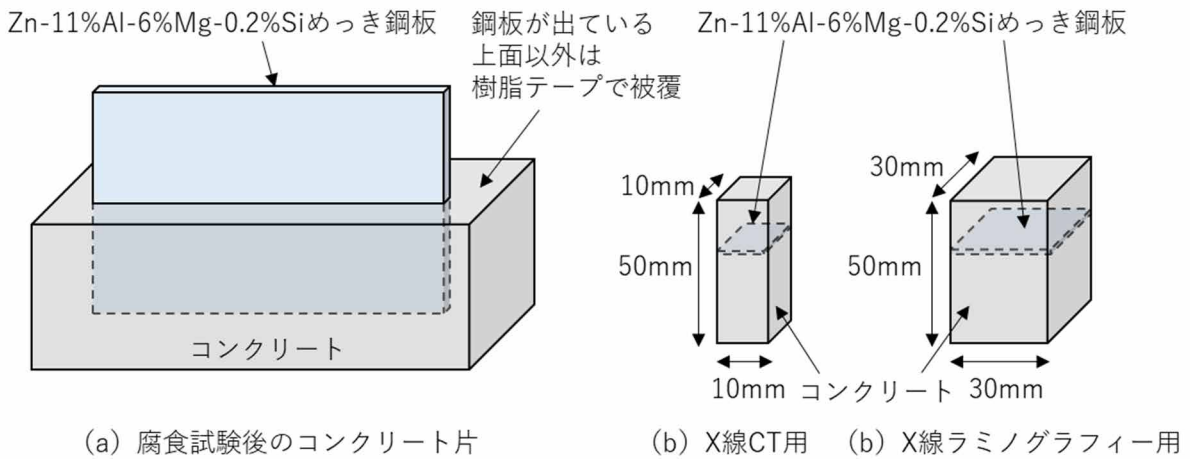


図 1. X線CT用およびX線ラミノグラフィー用試験片の作製方法

高エネルギー白色 X 線を用いた CT/ラミノグラフィー測定は、SPring-8/BL28B2 において実施した。各試験片は、CT 用（外径 50 mm×内径 46 mm×長さ 85 mm）およびラミノグラフィー用（外径 30 mm×内径 26 mm×長さ 85 mm）の試料ホルダー（透明アクリル管）に装填/固定した状態で試料台に設置/固定して、CT 測定時は鋼板面と平行な方向から、ラミノグラフィー測定時は鋼板面から 30°傾斜させた方向から X 線を照射した（図 2a、図 3a）。X 線のビームサイズは 2.8 mm(V)×34 mm(H) であり、ビームラインに常設されている X 線イメージングユニットと CMOS カメラを組み合わせた X 線カメラを試料の後方に配置して、試料を透過した X 線透過像を撮影した。この構成における X 線カメラの実効的な画素サイズは 7.31 $\mu\text{m}/\text{pixel}$ であった。断面像の再構成はフィルタードバックプロジェクションで行った。

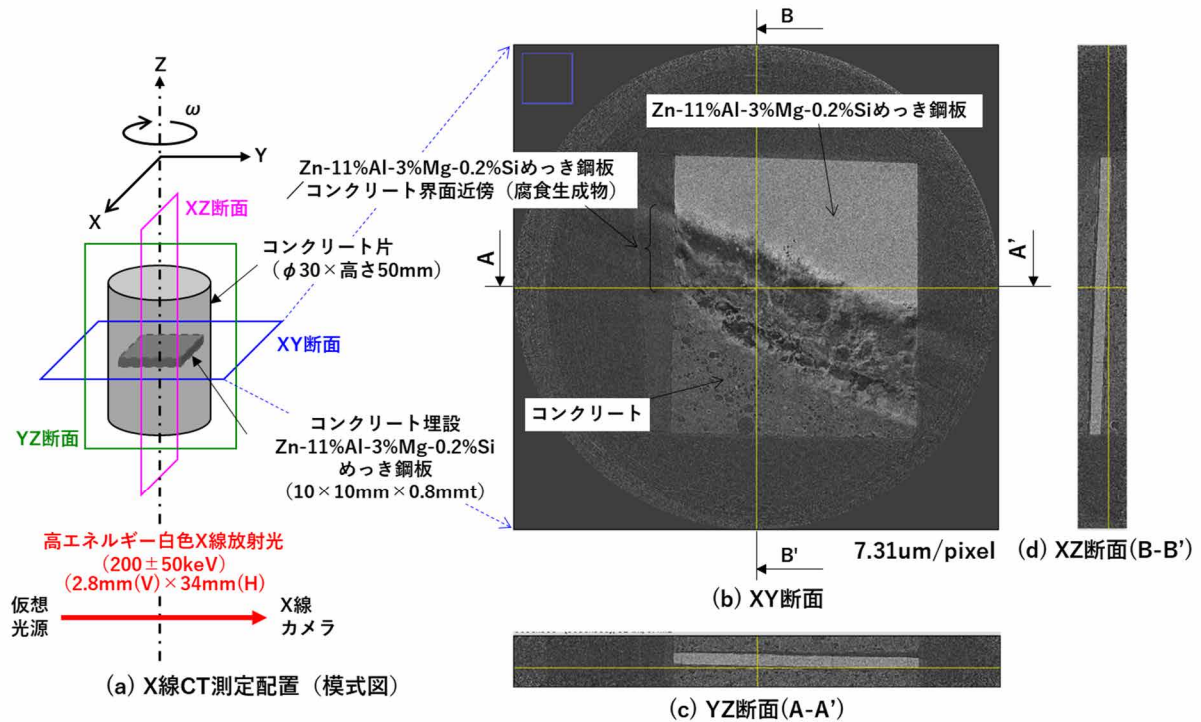


図 2. Zn-11%Al-3%Mg-0.2%Si めっき鋼板/コンクリート界面の X 線 CT 断面像

結果および考察：

コンクリート中に埋設された 10 mm 角ならびに 30 mm 角の Zn-11%Al-3%Mg-0.2%Si めっき鋼板に対して、鋼板面と平行に X 線を照射する X 線 CT、ならびに鋼板面から 30°傾斜させた方向から X 線を照射する X 線ラミノグラフィーによって、試料中心部の X 線透過像をそれぞれ測定した。そして、これらの X 線透過像から、Zn-11%Al-3%Mg-0.2%Si めっき鋼板/コンクリート界面近傍における XY、

YZ および XZ 断面像を 3 次元再構成した (図 2b~図 2d、図 3b~図 3d)。この時、3 次元再構成された XY、YZ および XZ 断面像におけるコントラストは、密度による線吸収係数の違いが反映される。つまり、X 線 CT および X 線ラミノグラフィーいずれの場合においても、コンクリート/鋼板界面を特定できる同様なコントラスト (濃淡/黒白) が断面像には確認されており、金属 (淡/白)、腐食生成物/コンクリート/骨材 (灰)、空隙/亀裂 (濃/黒) の分布が反映されていると考えられる。

今回の結果から、X 線ラミノグラフィーを用いると、X 線が透過せず、X 線 CT では対応できない 30 mm 角を超える面積のコンクリート中鋼材表面についても、コンクリート/鋼材界面の断面像/3 次元形状を非破壊観察できることが確認された。しかしながら、X 線ラミノグラフィーの場合、金属 (淡/白)、コンクリート/骨材/腐食生成物 (灰) ならびに空隙や亀裂 (濃/黒) の違いは判別できたが、コンクリート、骨材および腐食生成物については、X 線 CT と比較して、断面像のコントラストが不明瞭であり、測定条件や 3 次元再構成条件のさらなる最適化が必要である。

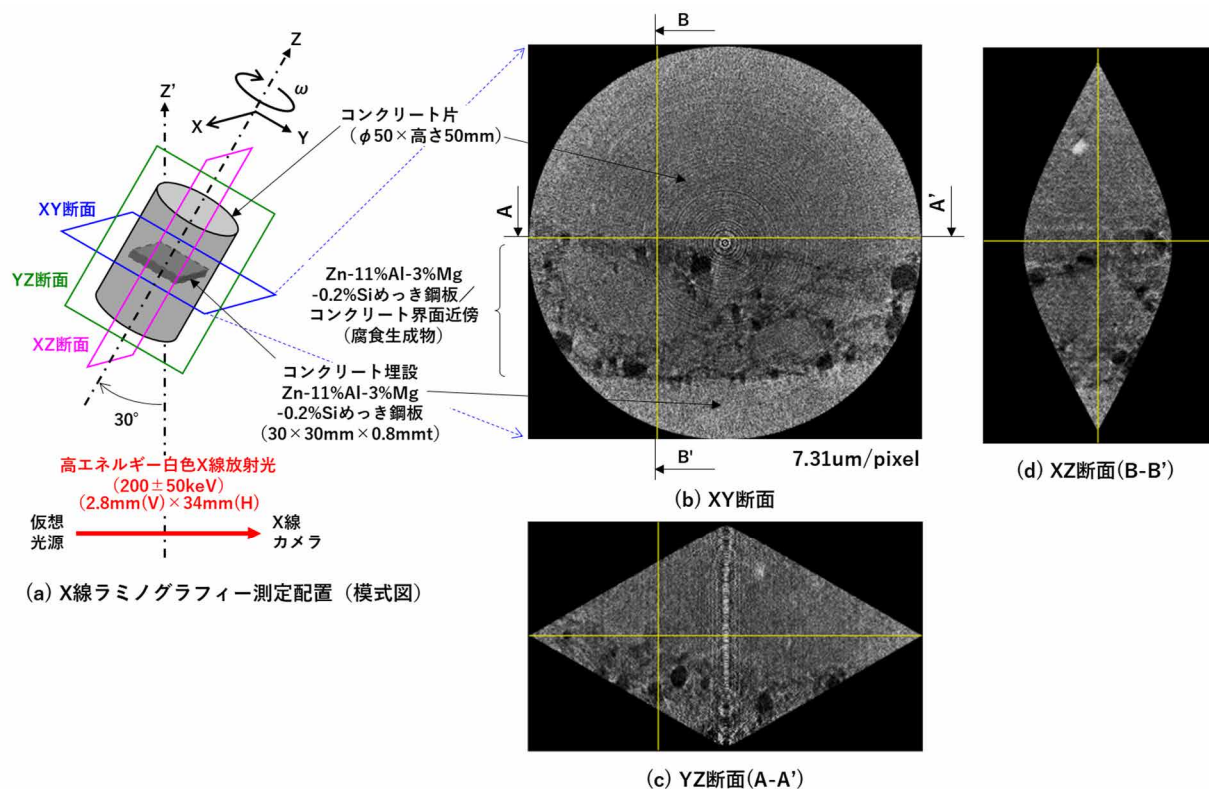


図 3. Zn-11%Al-3%Mg-0.2%Si めっき鋼板/コンクリート界面の X 線ラミノグラフィー断面像

今後の課題：

コンクリート中から鋼材を取り出す破壊試験によって評価されてきたコンクリート中金属表面の腐食状態について、X 線の照射条件 (強度、エネルギーや半値幅など) や検出条件 (X 線カメラの種類、カメラ長や検出感度など)、ならびに試料の作製方法や形状、あるいは X 線透過像から断面像を 3 次元再構成する方法などを最適化して、高エネルギー白色 X 線を用いた X 線ラミノグラフィーによって、コンクリート中鋼材表面を非破壊分析する評価技術の更なる高度化に取り組む。

参考文献：

[1] 西原克浩 他、材料と環境, 57, 76 (2008).
 [2] 西原克浩 他、材料と環境, 56, 314 (2007).
 [3] 西原克浩 他、令和 3 年度 SPring-8 一般課題(産業分野)実施報告書(2021A), pp.83, 2021A1636.
 [4] 西原克浩 他、令和 3 年度 SPring-8 一般課題(産業分野)実施報告書(2021B), pp.147, 2021B1891.