

放射光X線イメージングを用いたコンクリート中鋼板の非破壊観察 Nondestructive Observation of steel sheet in concrete using Synchrotron Radiation X-ray Imaging

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

40 mmΦ×高さ 50 mm のコンクリート中に埋設された幅 25 mm×高さ 60 mm の Zn めっき鋼板に対して、X 線 CT 測定を実施し、コンクリート/Zn めっき鋼板界面近傍の断面像を再構成した。再構成像の輝度を基に、再構成像全体の空隙率と、コンクリート/Zn めっき鋼板界面近傍の空隙率を算出した。その結果、再構成像全体の空隙率よりもコンクリート/Zn めっき鋼板界面近傍の空隙率は低い値であった。本手法にて、コンクリートと Zn 系めっき鋼板との密着性を評価できる可能性が示唆された。

キーワード： コンクリート中鋼板、Zn 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 線イメージング、コンクリート/Zn めっき鋼板界面構造

背景と研究目的：

Zn 系めっき鋼板は、合金組成や熱処理条件などの組織制御により、高強度化や軽量化といった製品性能が改善されてきた。しかし、Zn 系めっき鋼板の長期間にわたる耐食性維持には、Zn 系めっき鋼板のめっき層に生成される、腐食生成物（白錆）によるさらなる耐食性付与が必要となる。また、Zn 系めっき鋼板をコンクリート建造物の構造材料として用いた場合、コンクリート埋設鋼材の性能には、コンクリートと Zn 系めっき鋼板あるいは腐食生成物との密着性が大きく寄与する。

一般に、Zn 系めっき鋼板の腐食生成物は、Zn や Fe などの金属が H、O、Cl などと結合して生成され、内部には水分や空隙が含まれている。また、コンクリートと Zn 系めっき鋼板あるいは腐食生成物との密着性が悪い場合、剥離による空隙が発生する。さらに、コンクリートに埋設した Zn 系めっき鋼板を一部大気に露出させて使用する場合、大気露出部/コンクリート界面（地際）近傍で腐食が激しく、地際から 20–30 mm で顕著であるため、地際近傍における剥離発生が懸念される。

本研究は、コンクリート中に埋設した Zn 系めっき鋼板の密着性を評価する手法を開発するとともに、埋設する Zn 系めっき鋼板のめっき種による密着性や剥離発生位置（埋設深さ）、およびそれらの腐食環境や腐食時間による違いを調査することが目的である。最終的には得られた知見を基に、客先の使用環境に応じて適切な Zn 系めっき鋼板を選択すると共に、既存の製品群にて対応できない場合は、客先のニーズに対応した新しいめっき鋼板を開発して客先に提供する。これまで、高エネルギー白色 X 線放射光による X 線 CT 法や X ラミノグラフィ法を用いて、塩水噴霧による腐食試験後の Zn 系めっき鋼板をコンクリート中に埋設した試料を非破壊分析し、表面に露出していない埋もれたコンクリート/腐食生成物あるいは腐食生成物/Zn 系めっき鋼板の界面構造を可視化するための試料作製条件や測定方法を検討してきた[1]。

本課題では、これまでの検討内容によって得られた知見を基に、高エネルギー白色 X 線放射光を用いた X 線イメージング（X 線 CT 法）を用いて、コンクリート中に埋め込まれた Zn 系めっき鋼板表面近傍の空隙やき裂の分布などを非破壊観察する測定/解析条件を調査することが目的である。

実験：

本実験の供試材は、幅 25 mm×高さ 60 mm×厚さ 0.5 mm の Zn めっき鋼板を約 40 mmΦ×高さ 50 mm のアクリル筒に入れてコンクリートを流し込み、めっき鋼板を 20 mm 露出させて 40 mm をコンクリート中に埋設させたコンクリート片を作製した。高エネルギー白色 X 線放射光を用いた CT 測定は、SPring-8/BL28B2 において実施した。試験片が装填された透明アクリル管は、鉛直方向に平行な回転軸を持つ回転ステージ上に設置・固定した。そして、高エネルギー白色 X 線放射光 (200±50 keV) を試料に照射して、試料の後方に配置された X 線カメラで X 線透過像を撮影した。ビームサイズは 3.0 mm(V)×25 mm(H)であり、X 線透過像の撮影には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 (カメラ長：2210 mm) を用いた。透過像 1 枚当たりの露光時間は 180 ms で、試料を 180° 回転させながら、約 2700 枚の透過像を撮影した。

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 μm/pixel であった。断面像の再構成はフィルター補正逆投影法 (FBP：Filtered Back Projection) で行った。

結果および考察：

Zn めっき鋼板を埋設したコンクリート片の、埋設深さ 20 mm 位置における断面再構成像を Fig.1 に示す。再構成画像のコントラストは主に密度による線吸収係数の違いを表しており、密度が高い (線吸収係数が大きい) ほど明るいコントラストとなる。そのため、金属 (白)、コンクリート (灰)、空隙/き裂 (黒) が判別できる。ここで、再構成画像のエッジ部分が明るくなっているが、これは X 線の水平方向の長さ (25 mm) よりも試料の水平方向の長さ (40 mmΦ) の方が大きいことで、視野外の構造情報がノイズとして寄与することで、CT 再構成像のベース輝度が中心から外周部に向かって上昇するアーティファクトが発生したことによるものである。

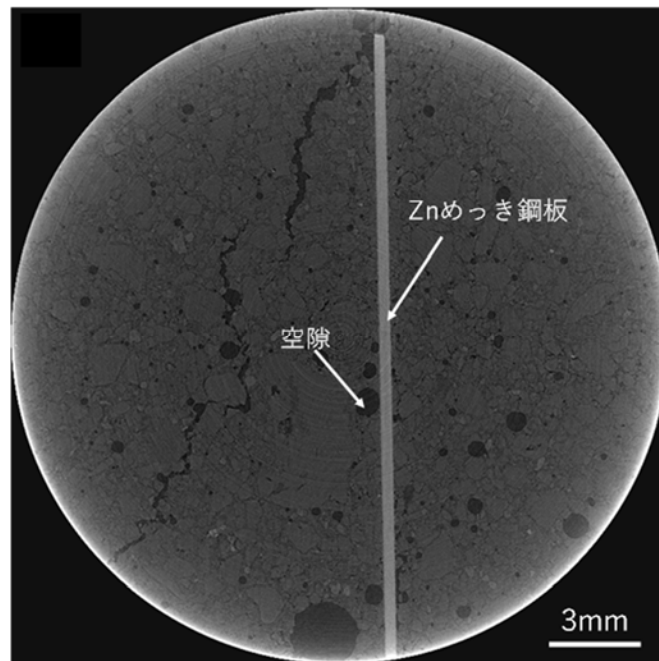


Fig.1 Zn めっき鋼板を埋設したコンクリート片の断面再構成像

Fig.1 の空隙の発生位置に着目すると、コンクリート/Zn めっき鋼板界面近傍の空隙は全体に比べて少ないように見られる。そこで、Fig.1 において、断面再構成像の全体と Zn めっき鋼板の表面および裏面から 50 μm 以内の範囲のそれぞれに対して、コンクリートに相当する画素値と空隙に相当する

画素値の画素数をそれぞれ計測し、空隙の面積比率を再構成画像の画素値から算出した。空隙率の算出結果を Table 1 に示す。

Table 1 空隙の面積比率

	Zn めっき鋼板
断面再構成像全体の空隙率	26 %
鋼板から 50 μm 以内の空隙率	9 %

断面再構成像全体の空隙率は 26%であったが、鋼板から 50 μm 以内の空隙率は 9%で、約 3 分の 1 だった。この結果から、コンクリートと Zn めっき鋼板が密着している可能性が示唆された。

本課題においては、Zn めっき鋼板が埋設されたコンクリート片に対して、X 線 CT 法を用いて内部構造を非破壊分析した。その結果、断面再構成像全体の空隙率とコンクリート/Zn めっき鋼板界面近傍の空隙率が異なり、コンクリートと Zn めっき鋼板との密着性を評価できる可能性が示唆された。

従って、高エネルギー X 線による CT 法は、コンクリート/Zn めっき鋼板の界面構造を非破壊で分析できる評価技術として適用できることが期待できる。

今後の課題：

今後は Zn めっき鋼板以外の鋼板を用いて評価を行い、コンクリート/Zn めっき鋼板界面における空隙率を評価する。評価結果から、Zn 系めっき鋼板の種類によるコンクリートとの密着性を調査する。また、コンクリート片に対して塩水噴霧試験を施して再度非破壊分析を行い、コンクリート中に埋設させた Zn めっき鋼板の腐食進行に伴う腐食生成物/Zn めっき鋼板界面の形状変化に及ぼす影響を調査する。

参考文献：

[1] 西原 克浩 他、令和 4 年度 SPring-8 一般課題(産業分野)実施報告書(2022B), 2022B1402.