

非破壊 CT-XRD 連成法を用いた塩化物イオンの作用を受ける  
硬化セメントペースト中の鉄筋腐食観察  
**Observation of Steel Corrosion in Hardened Cement Paste due to the  
Ingress of Chloride Ions using Non-destructive Integrated CT-XRD Method**

杉山 隆文, 高橋 駿人  
Takafumi Sugiyama, Hayato Takahashi

北海道大学  
Hokkaido University

コンクリート構造物の耐久性を著しく低下させる塩害は、コンクリート中の鉄筋の腐食によって生じる。鉄筋腐食はコンクリート中で生じるため、外観から観察することができず、従来法では腐食の進行を非破壊で観察することができない。そこで、非破壊 CT-XRD 連成法を用いて、セメントペースト中の鋼材の腐食について調べた。鋼材は、炭素鋼の他に、ステンレス鋼 (SUS304、SUS316) も使用することで鋼線の違いによる耐食性を調べた。CT 画像から炭素鋼の腐食が観察された。しかし、ステンレス鋼の腐食は観察されなかった。

**キーワード：** 非破壊 CT-XRD 連成法、コンクリート、鉄筋腐食、ステンレス鉄筋

**背景と研究目的：**

コンクリート構造物は、圧縮力に強いコンクリートおよび引張力に抵抗する鉄筋との複合構造物である。コンクリートと鉄筋は互いに相性がよく、コンクリート中の高アルカリ雰囲気によって、鉄筋表面には働体皮膜が形成されて、腐食発生を抑制している。また、両者の熱膨張係数も同程度であり、温度変化によるひび割れの発生も抑制できる。しかし、建設されて長期間を経たコンクリート構造物で、コンクリート内部に配置された鉄筋が腐食して、耐久性が大きく損なわれる事例が多く顕在化している。これは、塩分の浸透や中性化が原因である場合が多く、腐食の進行とともに腐食生成物による体積膨張でコンクリートがひび割れ、耐久性が大きく低下する。コンクリート中の鉄筋腐食については多くの研究が実施されているものの、セメント水和物と鉄筋表面との界面に着目した微視的な視点でこの腐食現象を観察した研究は見当たらない。また、腐食の発生は、塩化物イオン濃度や界面の不均一性などの影響を受けるため、鉄筋の腐食箇所を予め特定することは困難である。さらに、近年は耐食性を高めるためにステンレス鉄筋が使用されることがあるが、コンクリート中での腐食機構を普通鉄筋と比較して微視的に論じた研究は少ない。そこで、SPRING-8 の BL28B2 で研究開発した非破壊 CT-XRD 連成法を用いて、マイクロメートルオーダーでの CT 画像によって、鉄筋の腐食現象を観察して、さらに関心領域に対する X 線回折で腐食生成物を同定することを試みた。すなわち、まず CT 画像から腐食箇所を見つけ出し、その箇所を含む領域の X 線回折を行うこととした。これは、従来の検出法では困難であった非破壊の試験でしかも界面を微視的にかつ経時的に観察するはじめての試みである。2015B1569 では、セメント硬化体内部の鋼線の空間位置を CT 画像から特定して、次に鋼線の種類を XRD で同定することができた。本研究課題では、さらに 7 ヶ月間供試体を継続して塩化物イオンを含む溶液と接触させた後に、非破壊 CT-XRD 連成法を用いて測定した。

**実験：**

供試体は、普通ポルトランドセメントのみを結合材として使用した硬化セメントペーストである。鋼線は、炭素鋼であるピアノ線に加えて、鉄筋コンクリート用ステンレス異形棒鋼の鋼種に相当する SUS304 および SUS316 の 3 種類を用いた。鋼線の直径は、0.1、0.3、0.5 mm の 3 種類である。まず、型枠内に鋼線をセットして、練り混ぜたセメントペーストを型枠内に流し込んだ。24 時間後に脱型して水中養生を行い、直径が約 3 mm で高さが約 5 mm の円柱形に加工した。その際、鋼線は、円柱供試体の高さ方向に配置されるように加工して、その位置は断面の中心部に

なるように留意した。その後、円柱供試体の上下端面をエポキシ樹脂で被覆した。これは、両端面に露出した鋼線の腐食を防止するためである。

円柱供試体はアルミ製治具内の底板に、その下面が接するように接着して、治具は BL 内のステージ上に固定した。供試体上流のスリット 1 から供試体までの距離は 300 mm、XRD 用の半導体検出器 (SSD) と光軸のなす角度は  $10^\circ$  ( $2\theta=20^\circ$ ) である。ビームの幅は  $50\ \mu\text{m}$ 、高さは  $150\ \mu\text{m}$  である。XRD 測定では、照射時間は 300 s とした。供試体から下流側のスリット 2 までは 185 mm、スリット 2 から SSD 検出器前のスリット 3 までは 430 mm である。また、CT 撮影では、試料を透過した X 線は、そのエネルギーが 30 keV または 45 keV となるように、設置されたシリコン単結晶で反射されて、X 線カメラで補足される。なお、本研究課題では、X 線エネルギーを 45 keV と大きくして測定を行い、虚像を生じない範囲で、CT 画像をより鮮明に取得することも行った。ステップ角度は  $0.12^\circ$ 、露光時間は 200 ms であり、水平方向の画素寸法は、 $0.00513\ \text{mm}$  で画素数は 640pixel (X 線エネルギー：45 keV) または 980pixel (X 線エネルギー：30 keV) である。また、鉛直方向の画素寸法も同じ  $0.00513\ \text{mm}$  で、画素数は 768pixel である。したがって、CT 画像の 1 ボクセルは一辺が  $0.00513\ \text{mm}$  の立体となる。

### 結果および考察：

図 1 は、X 線のエネルギーを 45 keV とした場合の CT 撮影の結果である。3 種類の鋼線を配置した供試体の断面画像である。硬化セメントペースト中のほぼ中心部に鋼線が存在し、さらに鋼線とマトリックスの境界が明確である。ピアノ線の断面上部には腐食によると思われる硬化セメントペーストの変質状況がはじめて捉えられている。この上部を関心領域として XRD 測定を行い、ICSD におけるマグネタイトおよびフリーデル氏塩のピークが認められたが、詳細な解析は今後行う予定である。このように、腐食が生じたと思われる位置は、ピアノ線の断面上部であり、下部には生じていなかった。一方、図 1 に示すように、ステンレス鉄筋には腐食は認められない。これは、炭素鋼に比べてステンレス鋼材は一般に耐食性に優れているためである。したがって、本研究課題では、7 ヶ月間塩化物イオンを含む溶液と接することで、炭素鋼の腐食現象が認められたと言える。

図 2 は、X 線のエネルギーが 30 keV と小さい場合の CT 撮影結果であるが、明らかに、図 1 の断面画像がよりも鮮明度が低下している。また、撮影視野が増加する分、供試体の断面画像は小さくなった。今後は X 線のエネルギーを使い分けて CT 撮影する必要があると思われる。

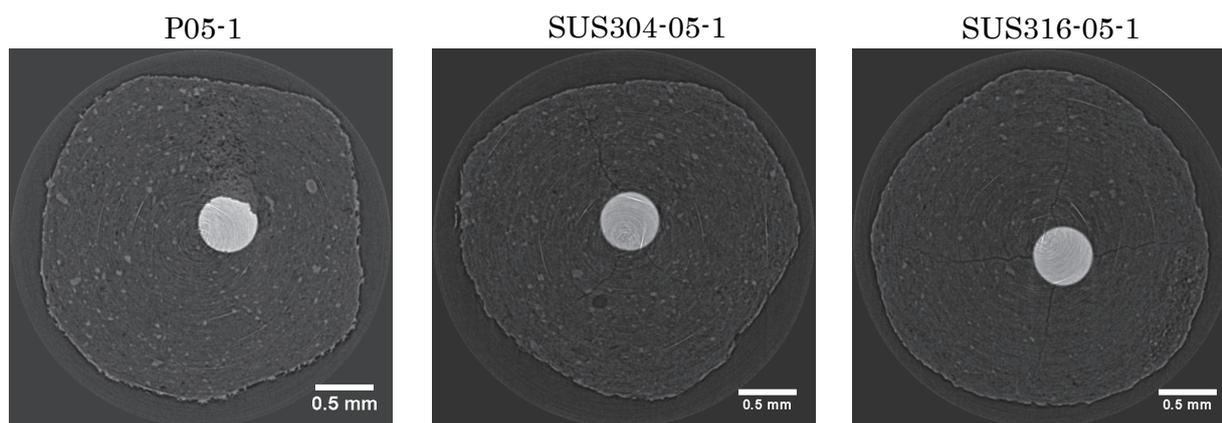


図 1 塩化物イオンの作用を受けた硬化セメントペースト内部および鋼線の CT 画像 (X 線エネルギー：45 keV)

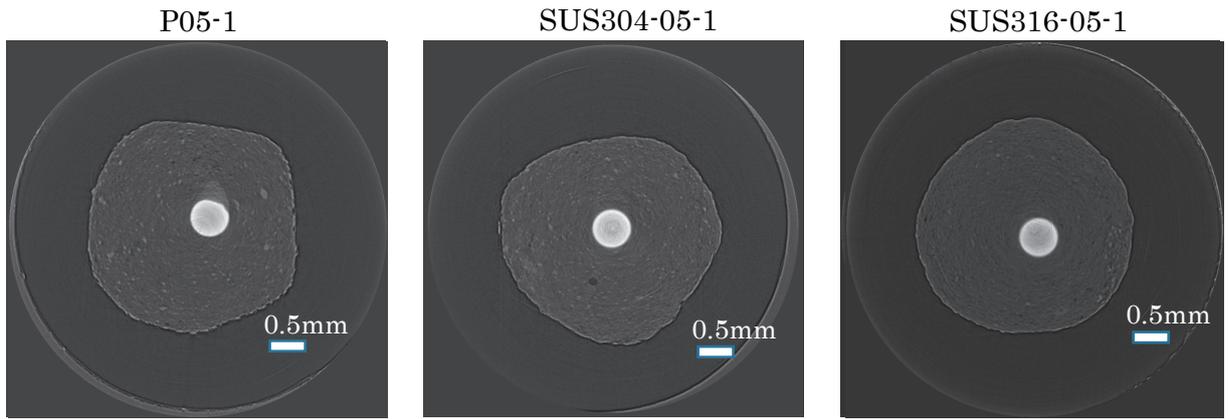


図2 塩化物イオンの作用を受けた硬化セメントペースト内部および鋼線の CT 画像 (X 線エネルギー : 30 keV)