

非破壊 CT-XRD 連成法を用いたセメント硬化体中の鋼線観察 Observation of Steel Wire in Hardened Cement Paste Using Non-destructive Integrated CT-XRD Method

杉山 隆文

Takafumi Sugiyama

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線の腐食の進行を調べた。鋼線は、ピアノ線の他に、ステンレス線(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 画像から鋼線の空間位置を測定して、鋼線の種類を XRD で同定することができた。

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：

社会基盤施設として多用されているコンクリート構造物は、コンクリートを鉄筋で補強された複合構造体である。圧縮力に強いコンクリートが引張力を負担する鉄筋と複合することで優れた構造性能を発揮する。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。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、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、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、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、腐食箇所を予め特定することは困難である。そこで、先ず 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。

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、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。先ず、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° ($2\theta=20^\circ$) である。ビームの幅は 50 μm 、高さは 150 μm である。

また、試料を透過した白色 X 線は、X 線エネルギーが 25 keV となるように設置されたシリコン結晶で反射され X 線カメラで補足される。CT 撮影では、ステップ角度を 0.12°、露光時間 200 ms をとした。水平方向の画素寸法は、0.00719 mm で画素数は 768pixel、鉛直方向の画素寸法は 0.00508 mm で画素数は 768pixel である。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。

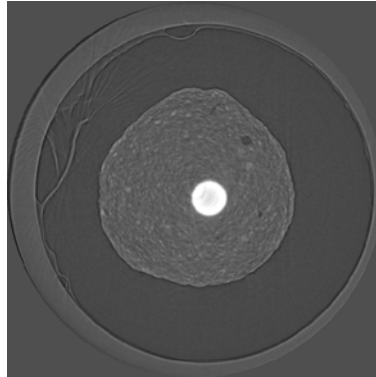


図 1. CT 画像(SUS316, 直径 0.5 mm)

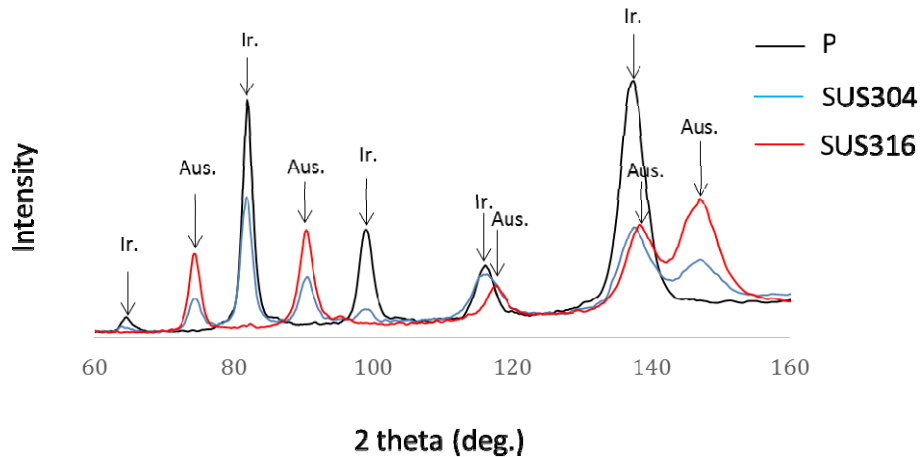


図 2. セメントペースト中の鋼線(直径 : 0.5 mm)中心部の XRD

結果および考察 :

図 1 は、CT から得られた断面画像(SUS316)である。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。今回は X 線のエネルギーを 25 keV としたが、セメントペーストと鋼線を比較的明確に分離することができた。しかし、今後は境界をより明確にするために、異なるエネルギーで測定して、比較するのがよいと思われる。

図 2 は、それぞれピアノ線(P)、SUS304、SUS316 をセメントペースト中へ配置した供試体の各鋼線の XRD プロファイルである。回折の測定位置は、CT から得られた断面画像における各鋼線を中心である。図に示したピアノ線の主要な回折ピークは、鉄(Ir.)であり、SUS316 の主要なピークはオーステナイト(Aus.)である。SUS304 はオーステナイトに加えて鉄のピークも観察された。X 線強度は、鋼線の直径が大きくなるほど減少した。X 線が吸収された可能性が考えられた。また、回折の測定領域の長さは約 200 μm であり、直径が 0.1 mm の鋼線の測定時にはセメントペーストが含まれ、Portlandite と推察された回折ピークも確認された。

今後の課題 :

セメントペースト中の鋼線の腐食に対する抵抗性が大きく、腐食が生じていたかを断定することができなかった。特に、ステンレス鉄筋では腐食は生じていなかった。今後も引き続き塩水を用いて作用させて、鋼線の腐食形態を非破壊 CT-XRD 連成法を用いて観察する計画である。