

非破壊 CT-XRD 連成法による通水前後のセメント硬化体ひび割れ近傍における水和物組織観察

A Non-Destructive Coupled CT and XRD Method to Study Crack in Hydrated Cement System before/after Water Transport

杉山 隆文^a, 人見 尚^b, 梶原 聖太郎^c, 池田 昇平^a
Takafumi Sugiyama^a, Takashi Hitomi^b, Kentaro Kajiwara^c, Shohei Ikeda^a

^a北海道大学, ^b(株)大林組, ^c(公財)高輝度光科学研究センター
^aHokkaido Univ., ^bObayashi Co. Ltd., ^cJASRI

白色 X 線を用いた非破壊 CT-XRD 連成法を利用して、セメント硬化体の水和物組織の変質を調べた。硬化セメントペーストにあらかじめひび割れを発生させ、ひび割れ空間を水道としてカルシウム系水和物の溶解現象を再現した。CT 撮影で、ひび割れを含む硬化体断面図を作成した。そして、通水作用の前後で、ひび割れ近傍の関心領域を特定して、回折チャートを取得した。通水作用によって、ひび割れ空間の拡大と portlandite の溶解を明らかにした。

キーワード： セメント硬化体、非破壊 CT-XRD、カルシウム溶解、水和物分布、ひび割れ

背景と研究目的：

放射性廃棄物処分施設で利用が考えられるコンクリートでは、1 万年の耐久性が必要とされているが、周辺環境からの地下水による侵食作用でセメント水和物の溶脱が起き、コンクリートの強度の低下につながると考えられている。そして、この処分施設の安定性は解析的な予測を用いて評価されるが、予測の精度が低いため保守的な観点からは使用コンクリートの量は膨大になり、建造費用も多額となる。しかし、経済設計の観点からも解析予測の精度を向上させ、溶脱による変質を生じ強度の低下した領域を適切に見積もる必要があり、解析的予測精度向上のためには、溶脱の速度や溶脱が進行しやすい場所などの詳細なコンクリートの溶脱現象に関する知見が求められている。

そこで、2012A 期から、BL28B2 の白色光源を用い、マイクロメートルオーダーの CT と XRD を同一箇所に実施し、溶脱現象を詳細に観察する非破壊 CT-XRD 連成法の開発に着手してきた[1, 2, 3]。前課題では不均一性の著しいセメントペーストの観察を行い、CT で特定した関心領域から X 線回折信号のみを取得することに成功した。本研究課題では、スリットサイズや回折時の露光時間および供試体の回転などの測定手法の改善を踏まえて、非破壊 CT-XRD 連成法を用いて、通水による溶脱後のセメント水和物組織の変質を調べた。

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、水セメント比が 0.5 で通常強度の硬化セメントペーストである。52 日間水中養生後に、直径 5 mm で高さ 5 mm の円柱形に加工した。ひび割れ部の溶脱を調べるために、アルミテープを周囲に接着後、割裂で貫通ひび割れを導入した。通水試験は、供試体に圧着したチューブの上下端部に外部チューブ先端部を接続し、その一端をチュービングポンプのポンプヘッドを介して、給水タンクに取り付けた(図 1)。通水時の液速度は 50 cc/h とし、通水期間は 1 か月連続して実施した。

CT 撮影された透過像から、供試体の断面画像を再構成する。CT は、エネルギーを 25 keV、投影数を 900 枚、露光時間を 150 ms とした。画素寸法は、約 0.0074 mm で画素数は 735×735 pixel、全体視野は約 5 mm である。回折は、ビームの大きさを 0.15 mm×0.05 mm とし、回折角度を (θ) を 10°、照射時間は試験体を回転しながら 300 s とした。試験体を回転することで、回折に寄与する結晶粒が多くなり、回転なしの前課題と比べて、同定精度が向上している。

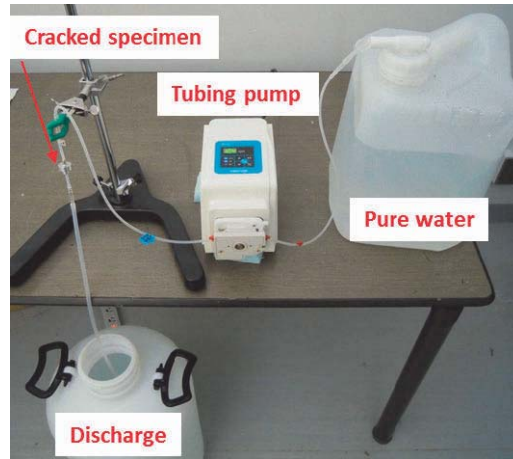


図 1. ひび割れ供試体への通水実験[3]

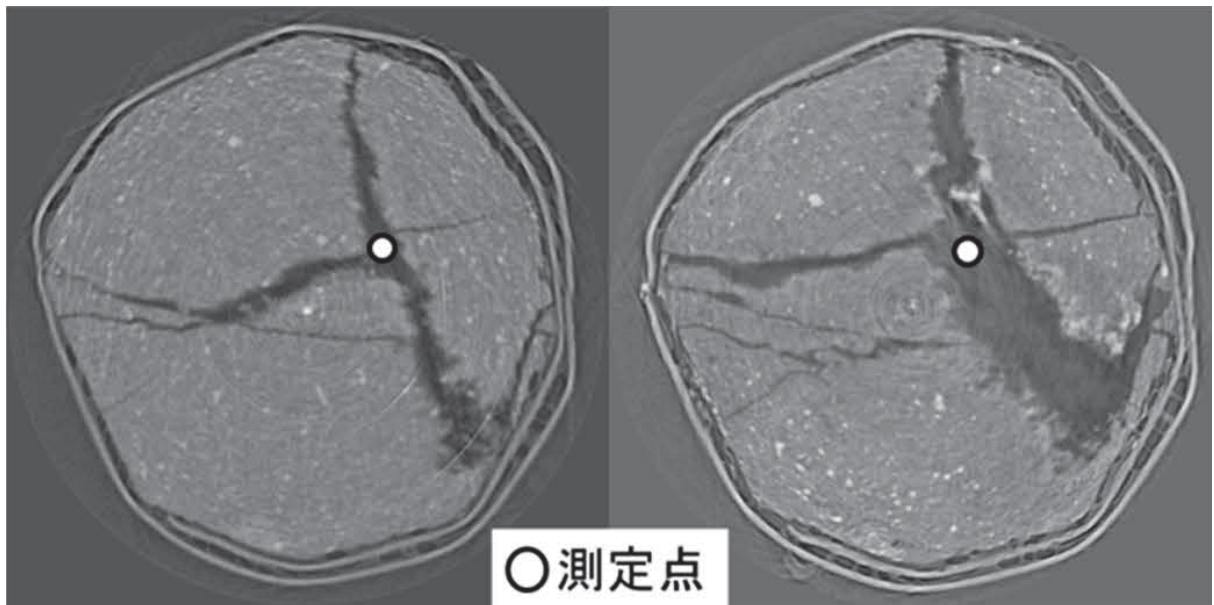


図 2. ひび割れセメント硬化体の通水前後の CT 断面画像(左：通水前、右：通水後)

供試体の高さ方向で複数の CT 断面画像を選択して、各断面において回折の測定対象とする関心領域を特定した。一つの断面に対してひび割れ近傍の複数の測定点を特定した。そして各領域に対し白色 X 線回折を行なった。

結果および考察：

図 2 は、通水前後の水セメント比が 0.5 の供試体の CT の断面画像である。ただし、通水後の CT 断面画像の座標が完全に一致していないが、これは次に述べるように、溶脱に伴うひび割れや試験体形状や通水による試験体座標が変化したために、座標調整が困難であったと推察している。通水後の試験体でひび割れの形状が明確に表れており、通水作用によってひび割れが変化していることが明らかになった。この CT 断面画像から X 線回折を測定する関心領域を特定した(測定点)。

X 線回折は、図 2 の測定点を中心とした領域について実施した。図 3 は、通水前と後の回折チャートを、結晶データベースの水酸化カルシウム(portlandite-ICSD)のピーク位置と比較した図である。また、図 4 は、同様に結晶データベースの石英(quartz-ICSD)のピーク位置と比較した図である。

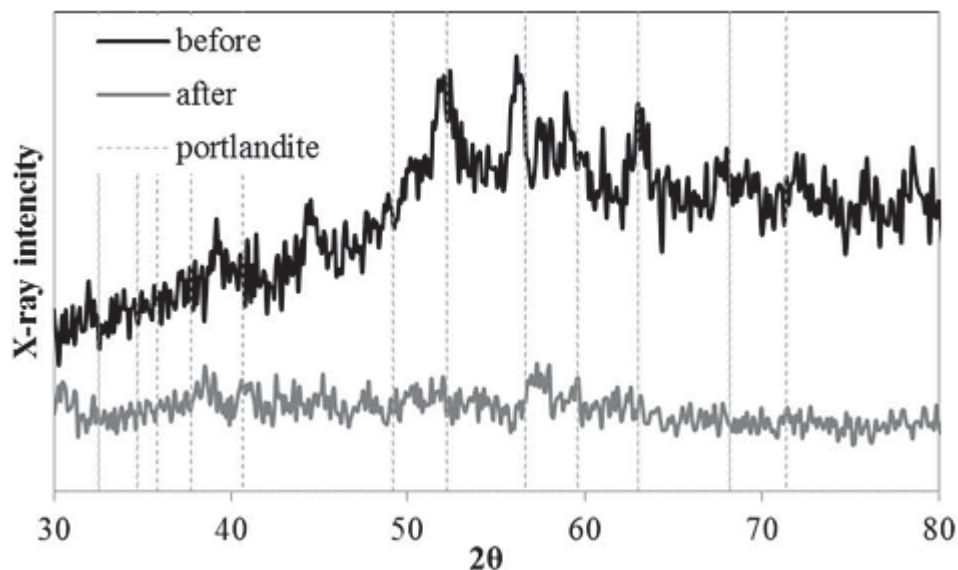


図3. 測定点における X 線回折チャート：portlandite の回折角との比較

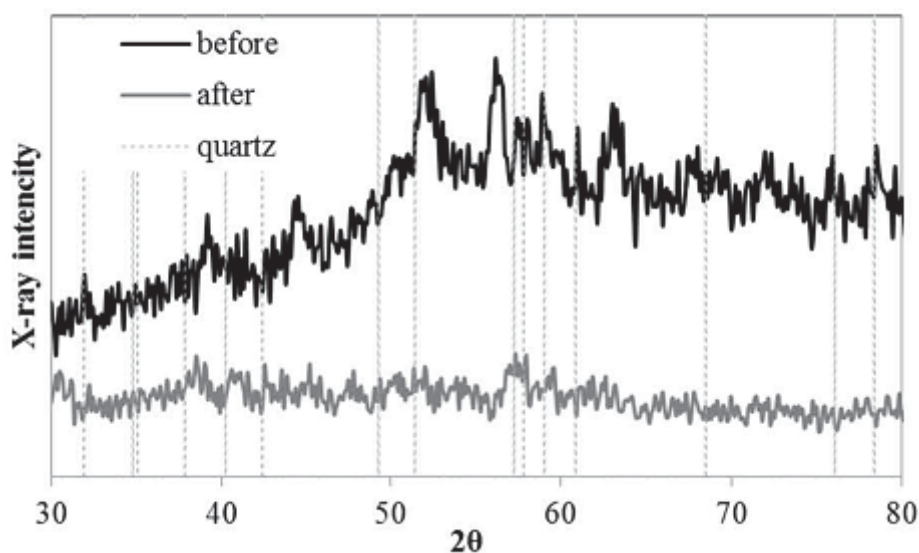


図4. 測定点における X 線回折チャート：quartz の回折角との比較

通水前の回折チャートのピークは、portlandite のピークと多くで一致していた。セメント水和物の中で比較的結晶性の高い水酸化カルシウムが、通水前のひび割れ近傍の測定点周辺にも存在していたことが明確に確認できた。同様に、図4からは、quartz の一部のピークとも一致することから、石英の存在も確認できた。石英は未水和セメント粒子にエアライトやビーライトとともに含まれている。したがって、ひび割れ近傍において水和していないセメント粒子が存在していた可能性がある。

通水後の回折チャートでは、ピークが減少して、全体的に強度は小さい。図2からは、通水後の測定点近傍は、若干ではあるが影が認められる程度であり、通水に伴い測定点を含めた近傍で水和物が溶脱した可能性が考えられる。また、通水作用によって、ひび割れの空間が増大したことも考えられる。今後は低水セメント比が 0.3 のセメントペースト硬化体を用いた実験結果と比較しながら、通水による溶脱やひび割れの増大の範囲を考察する必要がある。

まとめ：

非破壊 CT-XRD 連成法を用いてひび割れを有するセメントペースト硬化体の溶脱現象を調べた。通水前のひび割れ近傍では、水酸化カルシウムや石英の存在が明確に確認できた。これは、

測定手法の改善がもたらした結果である。通水後の CT 画像からは、ひび割れの拡大が認められた。また、水和物の溶脱が認められた。

参考文献：

- [1] 梶原堅太郎、人見尚、杉山隆文、第 67 回セメント技術大会講演要旨、セメント協会(2013)。
- [2] 人見尚、梶原堅太郎、杉山隆文、第 67 回セメント技術大会講演要旨、セメント協会(2013)。
- [3] 池田昇平、杉山隆文、人見尚、梶原堅太郎、第 67 回セメント技術大会講演要旨、セメント協会(2013)。