2024B1129 BL28B2

非破壊 CT-XRD 連成法を用いたセメント硬化体の ASR 骨材による ひび割れメカニズムの解明

Study on the Crack Propagation Mechanism of ASR in Hardened Cementitious Materials due to ASR Reactive Aggregate by Means of Non-Destructive Integrated CT-XRD Method)

髙橋 駿人 [a]
Hayato Takahashi[a]

[a] 東北大学
[a]Tohoku University

コンクリートの劣化現象の一つである骨材のアルカリシリカ反応（ASR）によるひび割れメカニズムを解明するため，BL28B2 で行われる非破壊 CT-XRD 連成法により，拘束力を与えたまま ASR 発生直後の供試体を観察した．その結果，骨材内部のマトリクスに反応生成物や反応リムが発生している様子が観察できた．また，骨材周囲のセメントペースト部を起点にひび割れが発生している様子が観察され，セメントペースト部に溶出したゲルが膨張したためと推察された．

キーワード： コンクリート，ASR，ひび割れ，非破壊 CT-XRD 連成法

背景と研究目的：

コンクリートは，基本的にはセメントの水和反応によって形成される「セメントペースト」と，砂・砂利といった「骨材」，の二相の複合材料としてみなされている．コンクリートの劣化現象の一つであるアルカリシリカ反応（ASR）は，骨材内部に存在する膨張相から骨材外周方向へ自由膨張による膨張圧が生じ，コンクリートマトリクスにひび割れを発生させ，重大な劣化を引き起こす．従来，ASR メカニズムは，コンクリート内部の反応性骨材が，コンクリート中特有の高アルカリ環境下かつ水の供給がある場合に自由膨張し，亀甲状のひび割れを生じさせるものであると考えられてきた．しかし，膨張圧発生メカニズムに関しては詳細な理解に至っていないのが現状である．現在，有力視されているメカニズムは，骨材表面近傍の領域に反応生成物により均等に膨張圧が生じると考えられている Reaction Rim Model（RRM）と，骨材中の局所領域に反応生成物が蓄積することで膨張圧が生じると考えられている Gel Pocket Model（GPM）であり，これらは骨材岩種によって異なる可能性が指摘されている[1]. 例えば, 安山岩のように緻密な岩石では，アルカリとの反応が表層から進展することで RRM によるひび割れが発生するが，片岩のように岩石組成が不均質である場合は反応生成物が局所的な結果に蓄積して GPM によるひび割れが発生しやすい．したがって，岩石組成や分布を把握しながら，反応生成物の反応，膨張圧の発現，膨張ひび割れパターンといった挙動を連動させて ASR メカニズムを理解する必要があり，その連動したメカニズムの理解には，数ミクロン以下の分解能かつ物理化学的に測定できる非破壊 CT-XRD 連成法の活用が欠かせない．すなわち，材料構成やひび割れの幾何学的情報を CT 観察により理解し，関心領域に対して組成情報を把握する XRD 測定を行い，ひび割れのメカニズムを精緻に把握することが重要であると考えられる．

本課題では，セメントペースト中に骨材を埋設した供試体に膨張を促進させ，非破壊 CT-XRD 連成法を用いて観察した事例を報告する．

実験：

供試体は水結合材比（W/B）が 0.5 のセメントペーストに，安山岩の反応性骨材を埋設したものである．これらの供試体を 2 体作製した（以降，供試体 A，B と称する）．使用したセメントは普通ポルトランドセメント（密度：3.15 g/cm^3），練混ぜ水はアルカリ総量が 10.00 kg/m^3 になるように 11.68 kg/m^3 に調整した NaOH 溶液である．上記の材料を練り混ぜ，ブリーディングがなくなるまで 30 分おきに練り返した後に，内径 5.0 mm（外径 6.0 mm）×10.0 mm の CFRP チューブに半分

程度打設し，その後に粒径 2.5mm 程度に粗砕した反応性骨材を中央に配置して，残りのセメントペーストを打設した．拘束を与えるため CFRP チューブから脱型せず，材齢 14 日まで NaOH 溶液中で養生した．その後，20℃の室温環境下で 1 週間静置して，以下の測定に供した．

測定手法として，X 線 CT 法による供試体内部の幾何学的形状や劣化状態を把握した上で，非破壊で局所 XRD を実施できる，非破壊 CT-XRD 連成法を用いた[2]．図 1 に非破壊 CT-XRD 連成法の概要を示す．CT 測定では，特定のエネルギーを取得するようシリコン単結晶で回折させ，透過像を取得して画像を再構成する．局所 XRD には，関心領域の固定のため白色 X 線を使用して，エネルギー分散型の回折プロファイルを取得する．実験測定条件は，X 線 CT 測定のエネルギーが 25 keV，投影数が 1500 枚，露光時間が 0.4 秒，画素長が 3.20 μm で実施した．XRD 用の半導体検出器（SSD）と光軸のなす角度は 5°（2θ＝10°）であり，ビームの幅は 50 μm，高さ 300 μm であった．また XRD 測定では，供試体から下流側のスリット 2 までは 170 mm，スリット 2 から SSD 前のスリット 3 までは 450mm であった．

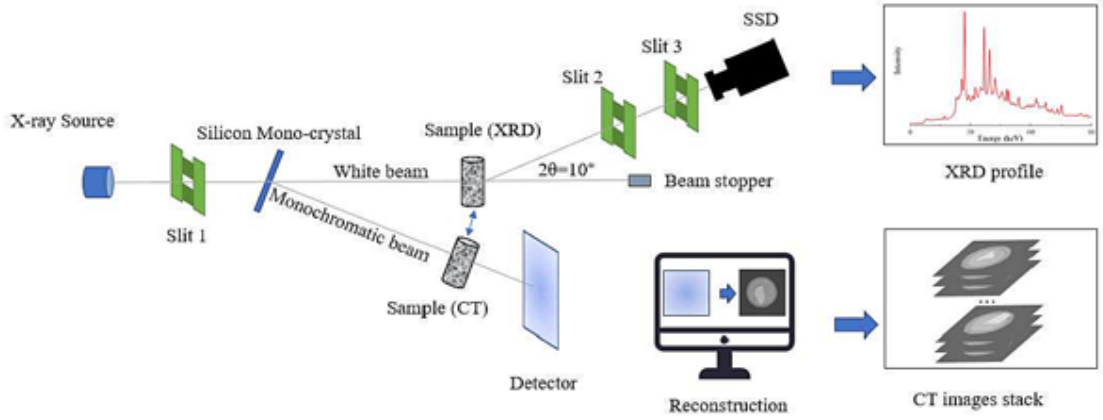
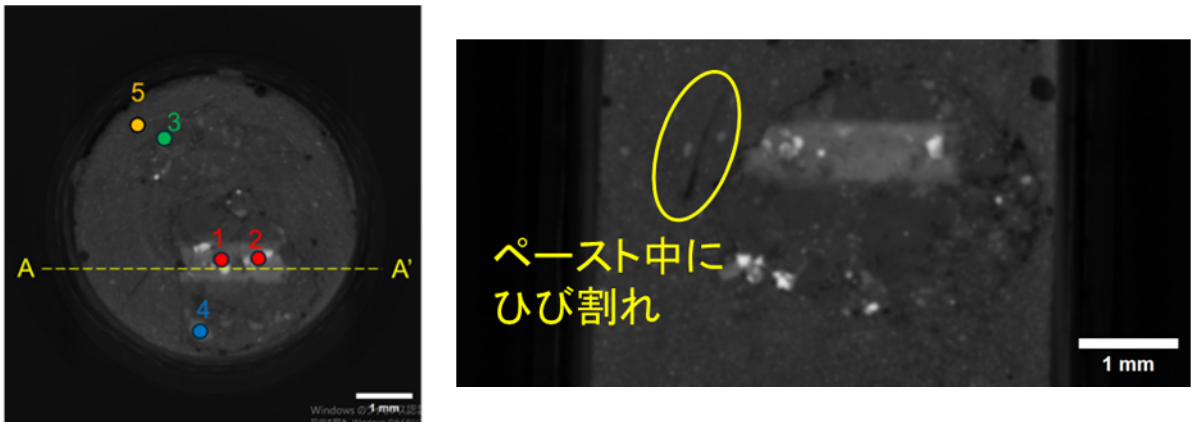


図 1．非破壊 CT-XRD 連成法の概要[2]

結果および考察：

図 2 に供試体 A 中の関心領域の CT 断面画像を示す．これによると，まずセメントペーストと骨材の領域が確認できる．また，骨材の外縁部にほぼ均一に空隙と思われる領域が確認できる．これに関しては，ひび割れとも考えられるが，打設時に一体化せずに生じたギャップの可能性も考えられ，今後の検討課題とする．一方で，骨材内部に局所的に ASR ゲルが生成していると思われる領域が見受けられる．これは練り混ぜおよび養生時に混入した NaOH 溶液によるアルカリ供給により反応したものと考えられる．また，輝度の高い骨材鉱物から溶出している様子が見て取れた．これは安山岩中に含まれる普通輝石（Pyroxene）から Si が多く溶出されたためと考えられ

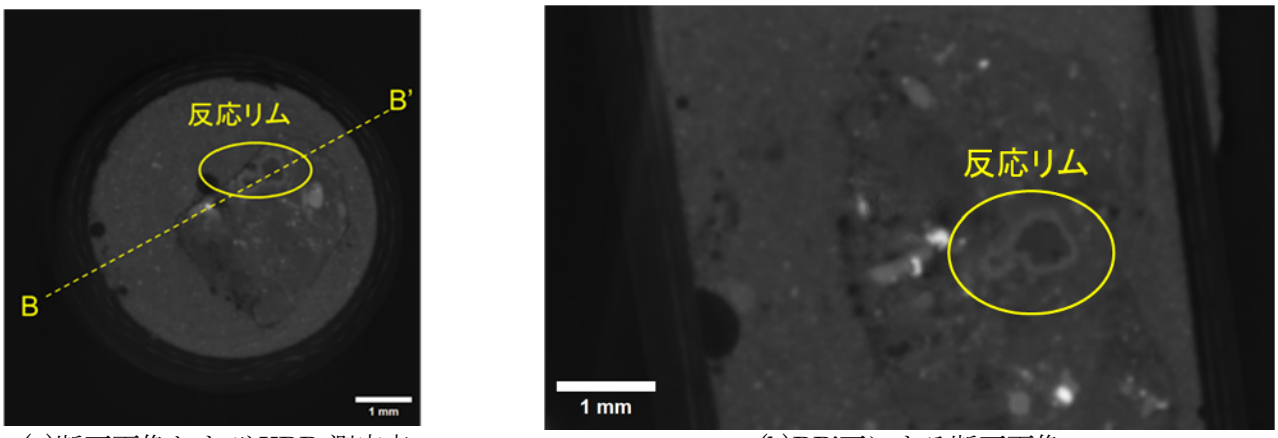


(a)断面画像および XRD 測定点　　(b)AA'面の断面画像

図 2．供試体 A の CT 画像

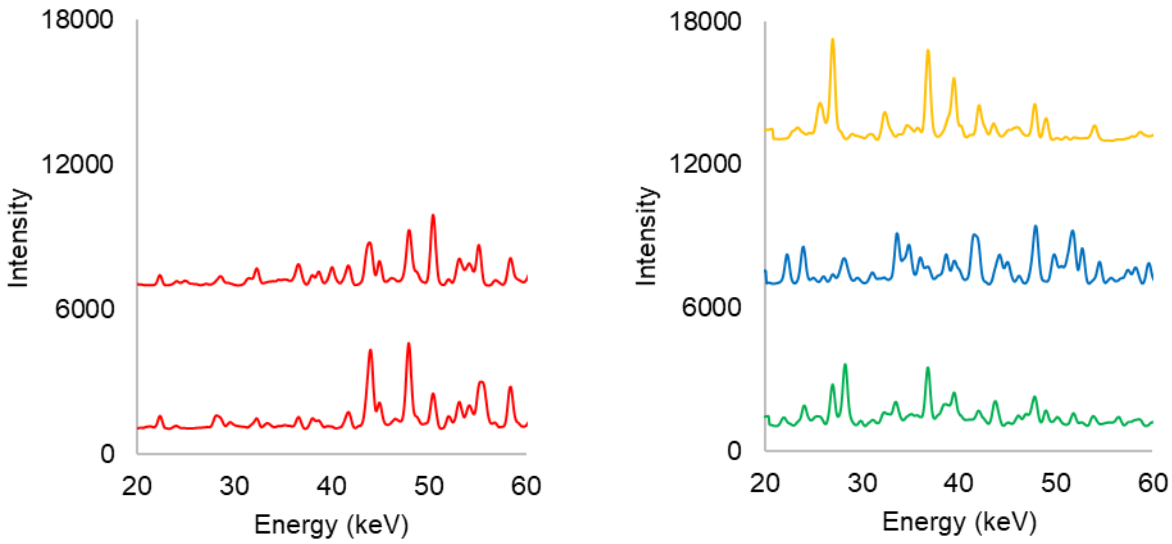
る[3]．また，ASR ゲルが生じている部分の骨材近傍のセメントペースト部に，骨材外縁部から連結していない形でのひび割れが生じているのが観察された．これは，セメントペースト部に ASR ゲルが溶出して，そこを起点に膨張圧が生じたため，ひび割れが生じたものと考えられる．また鉛直方向に CFRP チューブと平行に生じていることが確認できる．これは ASR の膨張圧が生じた際に CFRP チューブの拘束圧が干渉し，両圧力の垂直方向へとひずみが生じてひび割れが進展したものと考えられる．

図 3 に供試体 B 中の関心領域の CT 断面画像を示す．これによると，供試体 A と同様に，骨材の外縁部にほぼ均一に空隙と思われる領域が確認できる．また，骨材内部に反応リムと思われる輝度の高い層が観察される．反応リムは，通常は骨材周囲に生じるものと考えられているが，この画像から骨材内部の鉱物が反応して生じるものと考えられる．なお，供試体 A ではこのようなリムが観察されなかったため，このリムが生じる条件については今後詳細な検討が必要となる．



(a)断面画像および XRD 測定点　　(b)BB'面による断面画像

図 3．供試体 B の CT 画像



(a) 点 1，点 2　　(b) 点 3，点 4，点 5

図 4．XRD プロファイル

図 4 に，図 2 の各測定点に対応した XRD プロファイルを示す．これによると，骨材を対象とした点 1，点 2 では，骨材中の輝度の高い領域からは Pyroxene のピークが，その他の骨材領域である点 3，点 4 からは Plagioclase，Cristobalite，Tridymite などのピークが検出された．したがって，

輝度の高い Pyroxene を起点にゲルが溶出しているものと考えられる．一方，骨材近傍のセメントペーストを対象とした点 5 では，水酸化カルシウムである Portlandite のピークや，セメントクリンカーの一つである Larnite のピークが検出された．これは通常のセメントペーストの結晶鉱物相と一致しており，セメントペースト中からカルシウムが消費されるといった大きな変質は発生していないものと考えられる．なお，骨材中の別の鉱物箇所からは現在のところ反応は観察されておらず，一部の鉱物からのみ反応しているものと考えられる．したがって，Gel pocket model のように局所的に生成物が発生し，膨張・ひび割れに寄与する可能性が推察された．詳細は今後の観察で検討したい．

参考文献：

[1] T. Miura, *Cem. Concr. Compos*. **1044**, 105300 (2023).
[2] Y. Tan et al., *Construct. Build. Mater*. **369**, 130526 (2019).
[3] 小林一輔　他，生産研究，41(8)，681 (1989)