

CT画像解析と数値計算によるコンクリートの遷移帯物性値の推定

Estimation of physical properties of interface transition zone in concrete by CT image analysis and numerical calculation

北海道大学大学院工学院
北海道大学大学院工学院
北海道大学大学院工学研究院

○学生員
正員

成田陽大(Yota Narita)
譚穎垚(Yingyao TAN)
杉山隆文(Takafumi Sugiyama)

1. はじめに

2011年3月11日に発生した東日本大震災による福島第一原子力発電所での事故を受け、この発電所の廃炉プロジェクトが進められている。ここで発生するコンクリートの劣化損傷状態を把握して、汚染度合いを推定することが要求されている。想定される劣化の一つとしてコンクリートからのカルシウムの溶出が指摘されている。コンクリートが長期間水と接触することで、コンクリートの微細組織からカルシウムが溶出し、空隙が増加することで物質移動が容易となり、さらに空隙が増加する。コンクリート内部でカルシウムイオンが移動する経路は、セメントペースト中の空隙だけでなく骨材周辺の遷移帯においても生じると考えられる。遷移帯に着目した物質移動は古くから研究されているが、長期的に進行するカルシウム溶出をシミュレーションによって推定するにはその物性値を入力値とする必要がある。しかし、物質移動に影響を及ぼす遷移帯の拡散係数や空隙率は、直接測定が困難なため十分な知見が得られていないのが現状である。

そこで、本研究では微小供試体を用いた溶出実験を行い、溶出後の微小供試体に対して、マイクロメートルオーダーの分析が可能な非破壊 CT-XRD 連成法によってコンクリート内部を可視化した。さらに、微小供試体画像をモデル化することでイオン同時輸送モデル (SiTraM) による模擬計算から、カルシウム溶出による変質状況を再現した。この模擬計算では、遷移帯の空隙構造および水和物情報を入力値として与えるため、計算結果とCT画像の両者の遷移帯内部の溶脱進行度合いを比較することで、逆解析的に遷移帯の物性値を推定できると考えた。

2. 実験概要

2.1 溶出試験

供試体の概要を表1に示す。本研究では骨材とセメントペースト界面 (遷移帯) がカルシウム溶出に及ぼす影響を調べるために、セメントペーストを注入した円柱型枠内部に石灰石砕砂を1個慎重に配置した。円柱型枠はアクリル製である。

また、ブリーディングの影響を排除するために、セメン

表-1 供試体の作製

水セメント比	0.5
供試体寸法	円柱($\phi=3\text{mm}, h=6\text{mm}$)
セメント種類	普通ポルトランドセメント
骨材	石灰石骨材
養生期間	28日

トペーストを練り混ぜた後に数回練返しを行った後に型枠内に打ち込んだ。脱型後に28日間の湿潤養生を行った。溶出試験は恒温室で行い、供試体を純水10mlに浸漬した。純水は定期的に全量を交換した。

2.2 非破壊 CT-XRD 連成法

溶出試験開始から28日経過した供試体を大型放射光施設 SPring8 の白色 X 線回析ビームライン 28B2 を用いて非破壊 CT-XRD 連成法を行った。この手法は、先ず X 線 CT によって供試体内部の断面画像を取得し、次に得られた断面画像において関心領域を選定して、これらの領域に対して X 線回析測定を行った。X 線 CT の撮影ではシリコン単結晶を用いて白色光から単色光へ変換して、その際のエネルギーは25keV、解像度は $2.46\ \mu\text{m}/\text{pixel}$ 、露光時間は400msである。

2.3 SiTraM

SiTraM は、セメントの空隙構造、細孔溶液中の各イオンの相互作用、セメント水和物とイオンとの相互作用の3つのモデルから構成され、Fick の拡散方程式を有限体積法により離散化させることでコンクリート中のイオン移動を予測するモデルである。固液界面のカルシウムに関する平衡モデルは Buil のモデルを用いている。

3. 実験結果

3.1 CT 画像

図-1 は、供試体の CT 画像である。この画像は、全1440層中の第653層目であり、中央のうすい灰色は骨材で周囲はセメントペーストである。骨材部をすべて含んだ積層画像から骨材とセメントペーストを分離抽出することで骨材形状の3次元モデル化を行った。さらに、骨材とセメントペーストの境界面である遷移帯領域は、骨材の外周表面部から供試体表面部にわたる密度比を算出することで、遷移帯幅を $25\ \mu\text{m}$ と定めた。

SiTraM の解析結果と比較するために、CT 画像内の遷移帯領域の平均画素値を算出し、そこから遷移帯内部の溶脱領域を推定した。図-2 は、遷移帯画素領域の抽出についての概略である。具体的には、CT 画像から遷移帯領域のみを抽出し、SiTraM の解析において定めた関心領域とほぼ同じ場所に同距離の直線を定め、直線の始点から $50\ \mu\text{m}$ ごとの地点に着目し、それぞれの地点の上下 $12.5\ \mu\text{m}$ を高さとし、横幅は各地点で遷移帯領域をすべて含むよう任意に設定することで遷移帯画素領域を抽出した。そして、各地点での遷移帯の平均画素値を算出した。図-3 は図-1 の矢印方向における距離と平均画素値の関係である。なお、一連の操作はすべて、第653層目を中心とした第649~658

層の10層にわたり一括で行い、平均画素値の算出結果は連続した10層分の結果である。

図-3の結果より、CT画像から得られる遷移帯内部の溶脱領域と非溶脱領域の境界は、平均画素値が大きく減少し始めた350 μm 地点であると推定された。

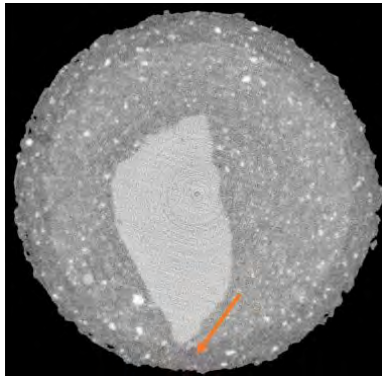


図-1 溶出試験後のX線CT画像（653層目）および着目した遷移帯領域（赤矢印）の概略

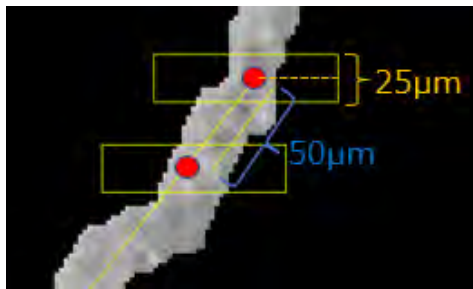


図-2 遷移帯平均画素値の抽出領域

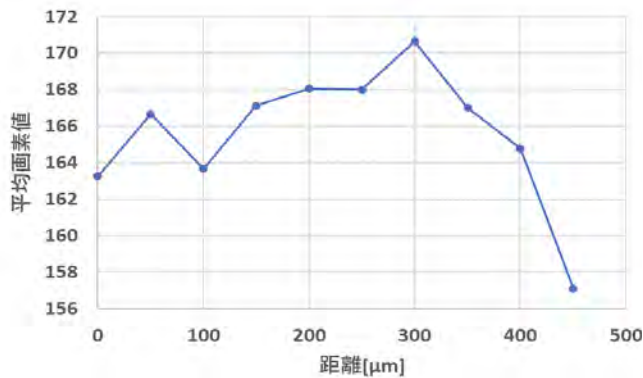


図-3 遷移帯平均画素値

3.2. SiTraM 解析結果

前述のCT画像から作成した骨材形状の3次元モデルに対して遷移帯物性値の入力情報を3パターンに変化させて計算した（表-2参照）。溶脱期間を720時間とした。コンクリートの物性値は、全パターンにおいて、拡散係数(cm^2/s)を 3.76×10^{-8} 、空隙率を0.2とした。したがって、遷移帯の拡散係数はコンクリート（母材）の10倍程度、空隙率は1.5~2倍とした。

SiTraMの解析においては、CT画像の第653層目に相当する断面に対して、水酸化カルシウムの残存固相濃度

に着目して溶脱領域を定めた。それぞれ3パターンの解析結果を図-4に示す。

図-4の結果より、ケース2は350 μm 地点まで溶脱が進行しており、ケース1,3は300 μm 地点まで溶脱が進行している。

CT画像解析とSiTraMの計算結果より、ケース1,3が遷移帯の物性値としては溶脱領域がやや大きくなり、ケース2の物性値ではほぼ同程度であった。CT画像解析における遷移帯領域の抽出間隔が50 μm であることを考慮すると、CT画像解析結果と各ケースの差異は顕著ではないため、遷移帯物性値を特定することはできなかったが、推定値の範囲としては妥当であると推察された。

表-2 遷移帯の物性値情報

ケース	拡散係数 (cm^2/s)	空隙率	CH(%)	CSH(%)
1	3.00E-07	0.4	60	60
2	1.00E-07	0.4		
3	3.00E-07	0.3		

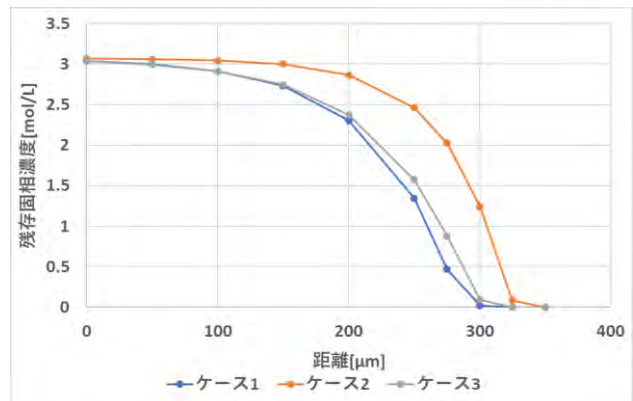


図-4 遷移帯領域の水酸化カルシウムの残存固相濃度

4. まとめ

遷移帯の物性値を推定するために、CT画像の画素値から遷移帯内部の溶脱領域を求めた。遷移帯平均画素値の抽出領域を50 μm としたとき、遷移帯物性値の推定値の範囲として、母材に対して拡散係数では10倍程度、空隙率では1.5~2倍とすることで数値解析結果とおおむね一致した。今後は、遷移帯物性値の拡散係数と空隙に加えて、CH、CSHの影響を調べることで、数値計算における入力情報の各要因について調べる。

謝辞：本研究は、科学研究費補助金（基盤研究B：課題番号21H01402）の一部を用いて実施しました。ここに銘記し、心より感謝申し上げます。

5. 参考文献

- 1) Kazuko Haga, Shunkichi Sutou, Michihiko Hironaga, Satoru Tanaka, Shinya Nagasaki, Effect of porosity on leaching of Ca from hardened ordinary Portland cement paste, Cement and Concrete Research 35(9), 1764-1775, September 2005.