

重点産業利用課題報告書 X線CTによるセメント水和物の分析に関する研究

大林組技術研究所 人見尚（009280）

1. はじめに

セメントは、水和により硬化し、その過程では様々な化合物が生成される。水和組織の成長過程や構造の理解は、コンクリートの強度、物質透過性や透気性などの物性の制御や、品質の評価に大きく寄与するものと考えられる。本報告では、X線CTより得られるセメント硬化体内部について、X線の透過割合を表すX線吸収係数を用いて、水和組織の分析を試みた。

2. 物質固有のX線吸収係数

セメント硬化体中の水和物のX線吸収係数の多くは、分子式や密度ともに求められており、これらの値を用いて水和物のX線吸収係数を求めることができる。セメント水和物としては、水酸化カルシウム（以下、CH）、カルシウムシリケート化合物（以下、CSH）、二酸化ケイ素（以下S）、水（以下H）および未水和のセメントクリンカー（以下、 C_2S 、 C_3S と表記）、を主要な物質とした。さらに、量は少ないがエトリンガイドとモノサルフェートを加えた。空気のX線吸収係数の値は密度が低いために、ほぼ0 [1/cm]である。

3. 高解像度X線CTの作る断面図の画素のヒストグラム

セメント水和物の密度の揺らぎや測定系の揺らぎのために、中央分散定理に従い、高解像度X線CTで得られる断面図の画素のX線吸収係数によるヒストグラムNはX線吸収係数xの関数としてガウス分布の線形結合となる。

すなわち、断面図のX線吸収係数に対し、ガウス分布の線形結合でフィッティングを行い、X線吸収係数の中央値 x_i を得てこの値がいずれかのセメント水和物のX線吸収係数に該当するかを調べることで、従来のX線回折分析法と同様に物質の同定が可能になると考えた。

4. 分析結果

X線CTで得られる断面図全体の画素数のヒストグラムに対し、X線吸収係数の関数としてフィッティングを行った。

フィッティングによって、ピーク値に対応するX線吸収係数が得られるが、この値に合致するX線吸収係数をもつセメント水和物を探すことで、断面図中に占める水和物の推定が可能になると考えた。

断面図を構成する画素には、単一の水和物が存在することもあるが、結晶水や空気などが含まれる場合も多く、この場合は水や空気のX線吸収係数が極めて小さいため、画素のもつX線吸収係数は小さくなる。モノサルフェートやエトリンガイドはケイ素酸化物のX線吸収係数に近く、量としては少ないため、今回は積極的に存在を調べない。

材齢の経過に伴うピーク値の変化は、セメントペーストの水和過程を表すと考えられる。材齢2日の試料は、CHを多く含みCSHはピーク値として表れなかった。このことは水和の初期においては、CHが大量に生成し、材齢7日においてCHがCSHに変化し、材齢28日のCHとCSHを含む試料に至ることがわかった。このことは従来のセメントの水和過程と一致している。

本試験で用いたセメントは、市販のセメントで、10%程度の発電に伴うフライアッシュなど廃棄物の混合が許されているため、二酸化ケイ素(S)はセメントに加えられた物質と考えたが S の存在形態にはさまざまな可能性が考えられるため、今後の課題である。

それぞれ水和物のピーク値を含むように X 線吸収係数の区間を水和物ごとに設定し、その区間に含まれる水和物を断面図に表示することで、断面図中の水和物を推定した。

水和物ごとの X 線吸収係数の区間は、材料ごとのピーク値の上限値と下限値の中間にしきい値を設定した。例えば、S のピーク値は 7~11[1/cm]に見られ、空気の X 線吸収係数は 0[1/cm]であることから、空気と S とのしきい値はその中間値の 3.5[1/cm]とした。CH と CSH の吸収係数は互いに近いため、今回は CSH のピーク値である 26[1/cm]と CH のピーク値である 29.6[1/cm]の中間値として 28[1/cm]とした。また CH と未水和のセメント鉱物とのしきい値は、CSH と CH のしきい値と CH のピーク値の差が 2[1/cm]であるため、これを X 線吸収係数の大きい側にも拡張し、32 [1/cm]とした。

今回の区間設定は暫定的なものに留まった。それぞれのピーク値の中間にしきい値を設定する方法に加え、立体的に求めた水和物量と他の方法で求めた水和物量との比較を行うことでこのしきい値の精度は向上すると思われるが、今後の課題である。

この値を用いて、断面図を区間ごとに色分けして表示し、図 1 に材齢 2 日の断面図を、図 2 に材齢 7 日の断面図および図 3 に材齢 28 日の断面図を示す。白色で表示した未水和のセメント鉱物部分は、材齢の経過に伴いだんだんと面積を縮小していく。未水和のセメント鉱物の周囲に CH が存在し、その周囲に CSH が存在している様子がみてとれる。また S はセメント鉱物から遠い場所に位置していることや、粒状に存在していることがわかる。

これらの結果を元に、断面図を集積して立体像を作成することで、水和物の空間分布を知ることができると考えられる。これにより、水和の経過や、カルシウム溶脱等のセメント水和物の変化を分布や立体構造の観点から検討することが可能になる。

5. まとめ

普通ポルトランドセメントを用いたセメントペーストの材齢 2 日、7 日および 28 日の試料について X 線 CT 観察を行い、断面図に含まれる画素数の X 線吸収係数のヒストグラムについて X 線吸収係数に区間を設けることによって X 線 CT の断面図におけるセメント水和物の位置を求めた。

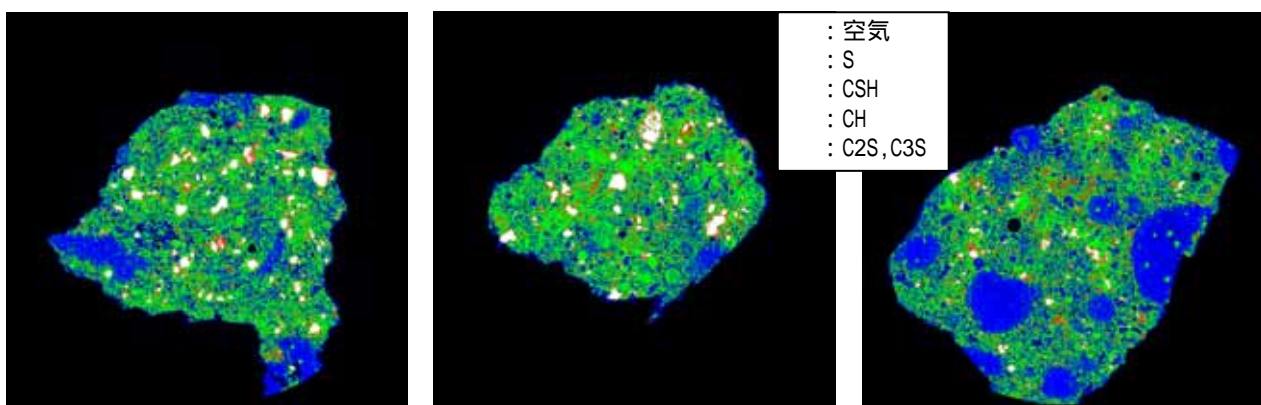


図 - 1 材齢 2 日の水和物分布

図 - 2 材齢 7 日の水和物分布

図 - 3 材齢 28 日の水和物分布