

水飽和度の違いに着目した X 線 CT による油の浸透可視化試験に関する研究

(財) 電力中央研究所 正会員 ○野原 慎太郎
 同 正会員 末永 弘
 同 正会員 宮川 公雄
 同 正会員 井野場 誠治

1. はじめに

X 線 CT は、X 線の透過性を利用して、対象物の断面をコンピューター上で再現し、物体の内部を 3 次元で可視化することができる。コンピューターの性能向上や画像再構成技術の向上もあいまって、X 線 CT はより高分解能・高速を達成し、実用化されている。主に、医療において診断目的で使用されることが多いが、最近では、産業用の材料非破壊検査や地質試料の内部観察にも用いられている。また、地下水工学や石油工学の分野では、X 線 CT を用いてコア内の CO₂ や石油系炭化水素の移動を定量的に評価する試みもなされている^{1), 2)}。

本研究では、初期水飽和度が 0, 20, 30, 50% の供試体に油を滴下して X 線 CT で撮影した結果について示し、考察を行う。

2. 室内カラム試験

(1) 試験概要

カラム試験に用いた試験装置の概要を図-1 に示す。内径 218mm の塩ビ製カラムに、土粒子密度 2.71g/cm³ の砂を乾燥密度 1.50g/cm³ に調整し、70mm の厚さに充填した。砂の初期水飽和度は、0, 20, 30, 50% である。また、砂の表面中心部に置かれたプラスチック容器内に、シリンジを用いて油を 20ml 投入し、t=0 (油投入前), 1, 2, 5, 10, 30, 60 (分) に X 線 CT で供試体を撮影した。

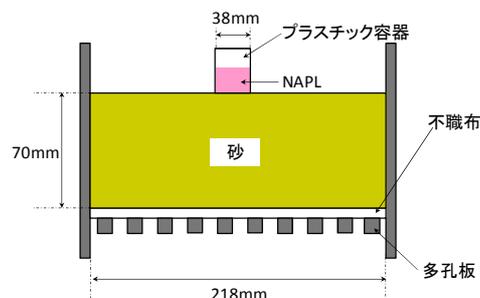


図-1 試験装置概要

X 線 CT にはいくつかの種類があるが、今回は医療用の X 線 CT を用いて撮影した。空間分解能は 0.35mm で、一回のスキャンに要する時間は数秒程度であった。X 線が物質を透過する時、X 線の減衰は式(1)で表され、CT 画像を構成する過程では、式(2)より CT 値 (CT-value) が計算される。

$$I = I_0 \exp(-\alpha x) \quad (1) \quad \text{CT-value} = (\epsilon_t - \epsilon_w) A / \epsilon_w \quad (2)$$

ここで、I : 透過後の X 線強度, I₀ : 入射する X 線強度, ε : 線減衰係数, x : X 線が通過する固体厚さ, ε_w : 水の線減衰係数, ε_t : 対象物の線減衰係数, A : 係数を表す。

X 線の透過性は、原子番号により決まり、大半は密度によって線減衰係数が異なる。密度の低い物質は線減衰係数が低く、密度の高い物質は線減衰係数が高いと考えて良い。線減衰係数から式(2)を用いて計算された CT 値は、CT 画像を構成する最小構成要素 (voxel : ボクセル) に格納される。そして、このボクセルに白黒の濃度差を与えることにより、ディスプレイに物体の断面が表示される。

表-1 試験条件

試験条件名	case01	case02	case03	case04
乾燥密度 [g/cm ³]	1.50			
間隙率	0.45			
初期水飽和度 [%]	0	20	30	50

表-2 油の物性値

	単位	値
密度 (15°C)	kg/m ³	870
粘性係数 (40°C)	Pa · s	6.76 × 10 ⁻³
粘性係数 (100°C)	Pa · s	1.88 × 10 ⁻³

キーワード : X 線 CT, NAPL, 油, 多相流浸透

連絡先 : 〒270-1194 千葉県我孫子市我孫子 1646 (財)電力中央研究所 地球工学研究所 地圏科学領域

3. 試験結果

以下に、各試験条件における 30 分後の撮影結果について示す。それぞれ油の浸透領域が鮮明に見えるようにコントラストを調整した。case01(初期水飽和度： $S_{w0}=0\%$)は、砂表面に半円状に白く表示される部分があり、これが油の浸透範囲と考えられる。間隙に油が浸透し、ボクセル内の線減衰係数が上昇して CT 値が上昇したと考えられる。一方、case02, 03($S_{w0}=20, 30\%$)についても、白く表示される部分があり、水・油が浸透した範囲であると考えられる。case04($S_{w0}=50\%$)についてもコントラストを調整したものの、油の浸透範囲を確認することができなかった。

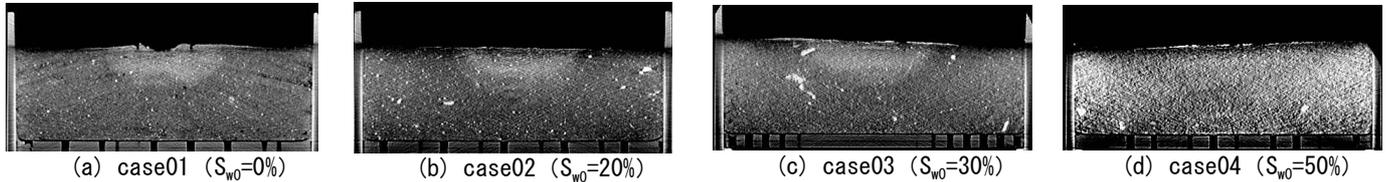


図-2 油滴下 30 分後の X 線 CT 結果

4. 考察

case01 と case03 を対象に 10 分後・30 分後の CT 値と、初期（油投入前）の CT 値の差を計算してプロットした結果を図-3 に示す。初期値からの変化量を計算することで、水・油が浸透した範囲を特定できると考えられる。case01($S_{w0}=0\%$)については、CT 値が増加している部分が油の浸透している範囲に相当し、10 分後には約 300~400 であったが、30 分後には約 100~200 まで減少している。これは、時間の経過とともに油の浸透範囲が広がって、油飽和度が減少したと考えられる。一方、case03($S_{w0}=20\%$)についても CT 値が約 100~200 増加している部分があるが、10 分後と 30 分後ではほとんど変化が無く、時間が経過しても油の浸透範囲が変化しない結果となった。

5. まとめ

本研究では、初期水飽和度が 0, 20, 30, 50%の供試体に油を滴下して X 線 CT で撮影した。試験の結果、油の浸透している範囲が白く表示されたが、初期水飽和度が 50%の供試体は油の浸透範囲を特定できなかった。次に、10 分後・30 分後の X 線 CT 結果と油投入前の X 線 CT 結果の変化量を計算し、水飽和度の違いによって CT 値の上昇範囲が異なること確認した。

今後は、X 線 CT 結果と従来用いられている油の浸透モデルとの検証を行うとともに、降雨等の外的要因が油の浸透範囲に及ぼす影響について検討する予定である。

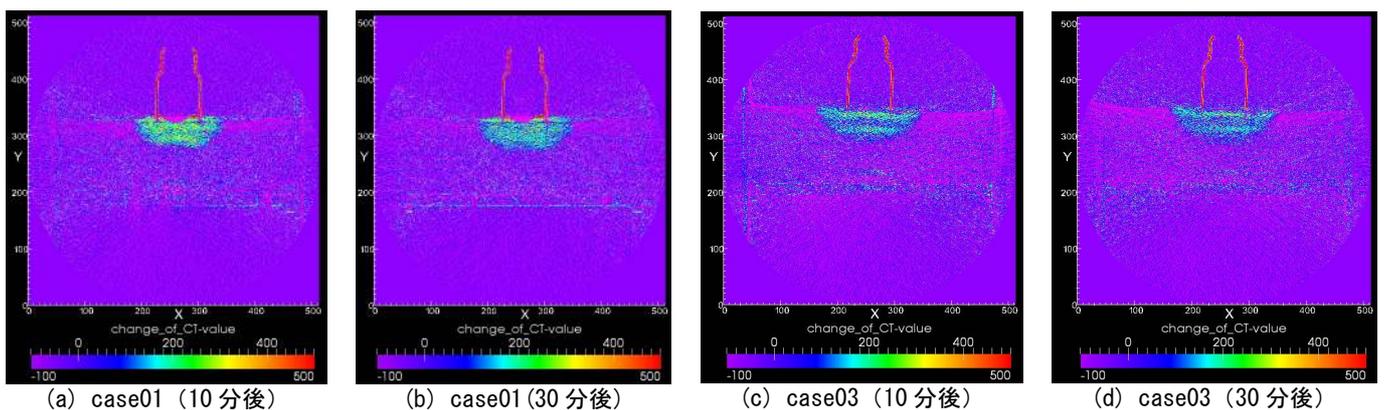


図-3 10 分後・30 分後の CT 値変化量計算結果

謝辞：本研究は、東京電力株式会社からの受託研究の一部として実施したものである。

【参考文献】

- 1) Perrin, J.C., M. Krause, C.W. Kuo, L. Miljkovic, E. Charoba, S.M. Benson : Core-scale experimental study of relative permeability properties of CO₂ and brine in reservoir rocks, Energy Procedia, Vol.1, No.1, pp.3515, 3522, 2009.
- 2) 野原慎太郎, 末永弘, 井野場誠治, 宮川公雄 : X 線 CT スキャナーを用いた油の浸透特性に関する研究, 日本地下水学会 2009 年秋季講演会講演要旨, pp.94-97, 2009.10.