水に長期間接していたコンクリートの変質状態の逆解析と超長期の変質予測

東京電力（株）　正会員　蓮本　清二　内田善久
東電設計（株）　正会員　橋本　淳　谷　智之　池谷 貞右
（株）大林組　技術研究所　正会員　○人見尚　斉藤　裕司

1. まえがき

放射性廃棄物処分施設への使用が検討されているコンクリートでは，地下水の作用を受けて水和生成物が徐々に溶解していく変質が懸念されている．その長期間に及ぶ挙動を数値解析的手法で精度よく予測するためには，モデルの信頼性の検証と重要な入力値である拡散係数の特定が不可欠である．斉藤らは，その一手法を提案[1]し，その適用性を検討してきた[2]．前報[3]では，透水性状が異なる岩盤に接していた二種類のコンクリートの変質状態を数値解析し，水和生成物の溶解モデルに若干改良の余地が残されているものの，それぞれの変質状態を良く再現でき，環境の相違を境界条件の相違として扱うことで，二種類のコンクリートの変質状態の相違が説明できることを明らかにし，モデルの信頼性を確認した．本報では，ダム堤体の水中部から採取したコアの水和組織の変質状態を逆解析して，このコンクリートでの拡散係数を特定した．また，この結果から約10万年間の変質状態を予測してみた．

2. 解析対象

今回，解析の対象としたコンクリート構造物は約48年間供用されてきたダムで，ダム湖水面下の堤体のコアを採取した．このコンクリートの水結合材比は0.5であり，結合材の30%をフライアッシュで置換している．図-1に示したように，水との接触面から約0.5cmの範囲は中性化しており，約1cmまでの範囲の水和組織はやや粗くなっていた．また，ダム湖水の水質は関東地域の河川水の平均値よりも小さな値であった．

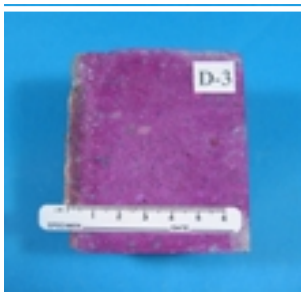

図-1　中性化試験結果

3. 解析モデル

計算に用いた基礎方程式[1]は(1)式に示す物質移動を扱う一次元の一般式である．本解析モデルの特徴は，(2)式に示すように，$Ca(OH)_2$の溶解に伴って拡散係数が変化するとしたことである．また，Ca^{2+}イオンの拡散速度は水和生成物の溶解速度に対して無視できるほど小さいため，細孔溶液中のCa^{2+}イオン濃度は常に当初の濃度が維持されていると仮定するとともに，$Ca(OH)_2$が消失した部分ではC-S-Hの溶解が生じることとして，水和生成物の溶解をモデル化している．更に，各種環境下における端面からのCa^{2+}の逸散の相違を表現するために，拡散係数を境界条件として与えている．計算には差分法を適用している．

$$\frac{\partial C}{\partial t} = D\frac{\partial^2 C}{\partial x^2} - U\frac{\partial C}{\partial x} + R \qquad (1)$$

$$D = D_0 + (D_1 - D_0)(1 - CHx/CHi)^2 \qquad (2)$$

ここに、

D_0；未変質部のCa^{2+}イオンの拡散係数[m^2/sec]
D_1；変質部のCa^{2+}イオンの拡散係数[m^2/sec]
CHx；溶解後の残存$Ca(OH)_2$量[mol]
CHi；当初の$Ca(OH)_2$含有量[mol]

4. 解析条件

変質状態を逆解析するに際して用いたコアの入力定数を表-1に示す．未変質部におけるCa^{2+}の拡散係数は通常よく用いられている1E-8[cm^2/s]とし，変質部の拡散係数はパラメーターとした．細孔溶液中のCa^{2+}イオン濃度は20mmol/lの値を，端部からのCa^{2+}の逸散程度を示す境

表-1　入力定数

W/(C+F)	S/C	密度 [g/cm^3]	含水率 [%]	CH濃度 [mol/l]	C-S-H濃度 [mol/l]
0.5	2.16	2.316	12.7	0.39	3.67

水和生成物、溶脱、変質、モデル、逆解析
〒204-8558　清瀬市下清戸4-640　TEL　0424-95-1107　FAX　0424-95-1091

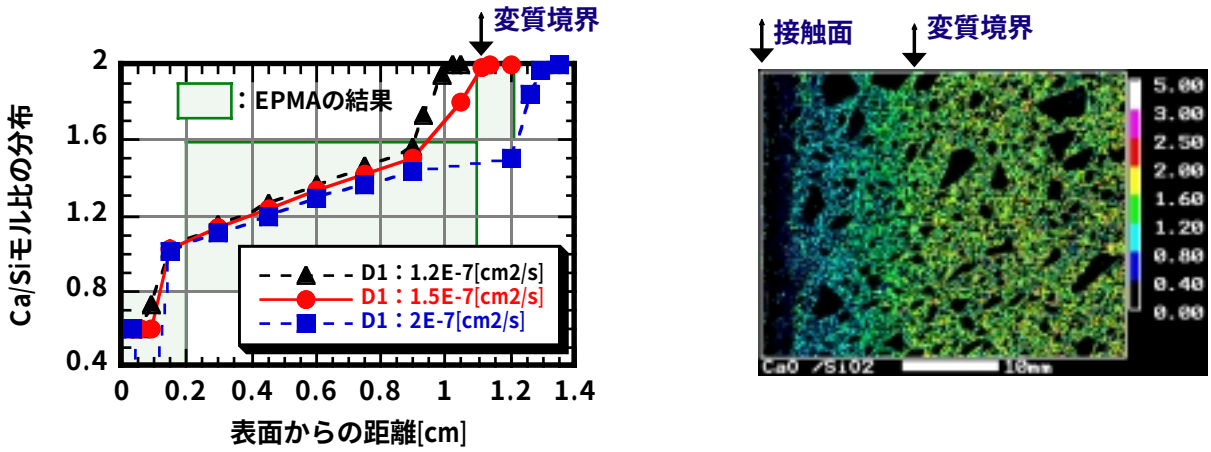

図-2　Ca/Si モル比の逆解析結果

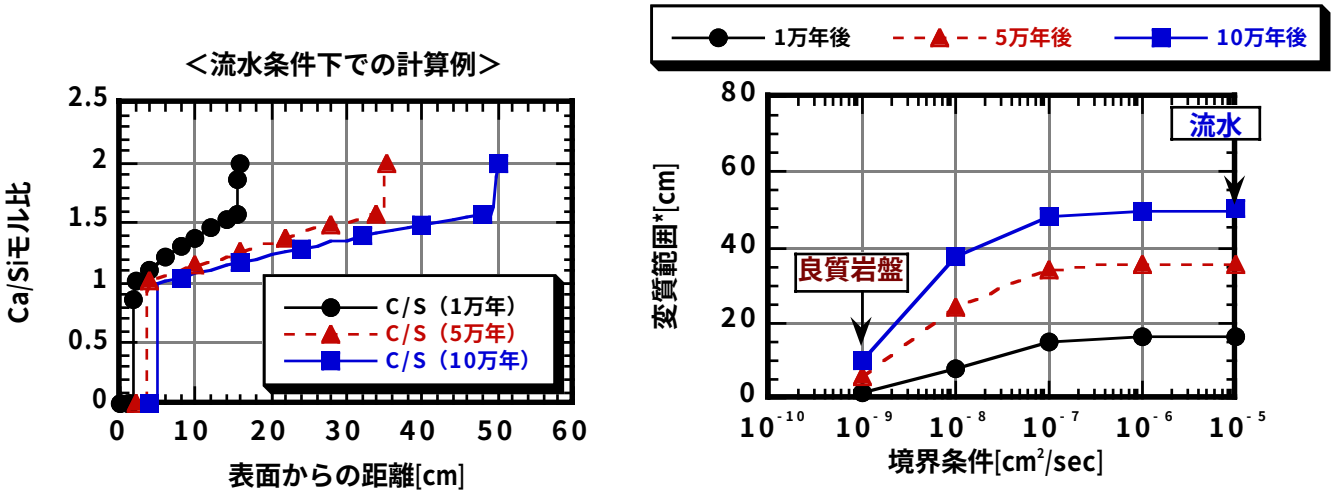

図-3　超長期における変質状態の予測結果

界条件には，水中での Ca^{2+} イオンの拡散係数に相当する 1E-5[cm^2/s]を与えた．また，計算条件となる単位セルの大きさと時間ステップはそれぞれ 0.03cm と 5,000 秒とした．

5. 変質状態の逆解析と超長期の変質予測

変質状態の逆解析結果を図-2 に示す．変質部の Ca^{2+} の拡散係数が大きくなるに従って CH が溶解した変質範囲は増加し，1.5E-7[cm^2/s]を与えた場合に変質範囲の解析値が測定結果と一致した．また，Ca/Si モル比の解析結果も EPMA による測定値とほぼ一致している．溶解によって空隙は増加し，拡散係数も増加していくことが知られている．この試料では，変質部の空隙が約 30%ほど増加しており，拡散係数は 1 オーダー大きくなる結果となった．空隙の変化量と拡散係数の変化量との定量的な関連付けは今後の課題である．

次に，10 万年間の予測を行った結果を図-3 に示す．溶脱に対して最も厳しい流水条件下において，10 万年後には表面から約50cmまでの範囲で水和物の一部が溶解するが，水和生成物の全てが溶解する範囲は約5cmに止まる結果となった．また，環境条件の検討例を同図に併記した．環境は境界条件[cm^2/s]として考慮し，1E-9 は良質の岩盤[3]に相当する．良質の岩盤では変質が非常に少ないが，1E-7 までは徐々に増加し，それ以上ではあまり変わらない結果となっている．実際の処分施設においては高密度ベントナイトと接することが予想されるが，その場合の境界条件の特定は今後の課題である．

[参考文献]

1) 斉藤ほか：セメント水和生成物の溶解に伴う変質予測のモデル化，コンクリート工学論文集，Vol.11，No.1，pp.51-59，2000

2) 斉藤ほか：Ca^{2+} の拡散によって生じたモルタルの変質状態の逆解析，土木学会第５５回年次学術講演会概要集，2000

3) 斉藤ほか：岩盤に長期間接していたコンクリートの変質状態の逆解析と超長期の変質予測，土木学会第57回年次学術講演会概要集，2002