

放射性廃棄物処分場コンクリートの長期溶脱予測に関する研究

人見 尚 竹田 宣典
入矢 桂史郎

A Study on Long-term Prediction of Concrete Leaching in Nuclear Waste Repositories

Takashi Hitomi Nobufumi Takeda
Keishiro Iriya

Abstract

For prediction of the long-term properties of concrete used for radioactive waste disposal, we analyzed calcium leaching for various mortar and concrete mixes using 4 binders. Results show that, for mortars using ordinary portland cement and low heat portland cement, there is a drastic change point of CaO/SiO₂ ratio distributions, while for mortars using low alkali cement, there is no clear change point. According to the analysis result for 10,000 years, the leaching widths of mortar of 1,000 years are 64cm for ordinary portland cement, 55cm for low-heat portland cement, and 39cm for low-alkali cement, all with 45% water-binder ratio. For the mortar, we found that the leaching length was proportional to the square root of the elapsed time. By comparing the analysis results for concrete and mortar, we found that the decrease in CaO/SiO₂ ratio is low and leaching width changes are in the transition band between aggregate and mortar.

概 要

放射性廃棄物処分場におけるコンクリート構造物中のカルシウム溶脱の長期的予測方法の確立を目的として、各種結合材を用いたモルタルおよびコンクリートの溶脱解析を行った。その結果、普通ポルトランドセメント (OPC) および低熱ポルトランドセメント (LPC) を用いたモルタルでは、溶脱の進行に伴い、急激にセメント水和物中のCaO/SiO₂比が減少する位置が存在するが、低アルカリセメント (HFSC) を用いたモルタルでは、CaO/SiO₂比が急激に減少する位置は見られなかった。また、水結合材比45%のモルタルの10000年後の溶脱深さは、OPCでは64cm、LPCでは55cm、HFSCでは39cmと予測され、いずれの結合材を用いた場合にも、溶脱深さは時間の平方根により近似できることが明らかになった。コンクリートに対しては、粗骨材とモルタルの界面の遷移帯の存在により、溶脱深さは深くなるが、深さ方向におけるCaO/SiO₂比の減少割合が緩やかになった。

1. はじめに

原子力発電所の運転に伴い発生する放射性廃棄物は、10000年程度の半減期を持つ核種を含むことから、これを保管する処分場には、超長期の核種の封じ込め効果が必要とされる。このため、処分場のコンクリート構造物の超長期における品質を予測する必要があり、構造物の性能評価を行なう上では、モデルを用いた予測解析による証明が不可欠である。

岩盤や地下深部に建設される放射性廃棄物処分場では、使用材料は深層地下水との反応により徐々に劣化してゆく。特に、処分場の物理的バリアとして重要なコンクリートは地下水に溶け多孔質化し、物理的性質が低下するカルシウムの溶脱が問題となる。

本研究は、コンクリートの溶脱に関する解析手法の確立を目的としたものである。これまで、齊藤らにより溶脱の予測解析法¹⁾が提案されているが、複合材料であるコンクリートを均質体とみなしマクロ的に扱っているために、局所的に進行する溶脱現象を正確に表しているとはいえない。また、骨材やひび割れ等、コンクリートの

不均一性を考慮する場合、解析上の境界条件が極めて複雑になることから、従来の解析法では事実上解くことができなかった。

近年、新しい解析手法として複雑な形状を小さい計算負荷で扱うことのできる格子ボルツマン法 (Lattice Boltzmann Method : LBM) が提案され²⁾、コンクリート中の塩分浸透解析などに適用した例がある³⁾。本報告では、齊藤らが提案した化学モデル¹⁾に基づく溶脱のメカニズムを用い、LBMによる溶脱のシミュレーションにより、普通ポルトランドセメント (OPC)、低熱ポルトランドセメント (LPC) および低アルカリセメント (HFSC) を用いたモルタルについて10000年間の溶脱解析を行い、モルタルの溶脱抵抗性の評価を行った。また、粗骨材を考慮して、コンクリートの1千年間の溶脱予測も行った。

2. カルシウム溶脱のメカニズム

常時水に接するコンクリートでは、時間経過とともにモルタル中のセメント水和相からカルシウム (以下Caと

記述) が溶出して多孔質化する溶脱現象が起こる⁴⁾。カルシウムの溶脱は、式(1)に示すように、Ca濃度(C)に関する拡散方程式で表される。

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

ここで、tは時間、xは座標、Dはコンクリート中のCaの実効拡散係数、Uは移流速度およびRはセメント水和相から細孔溶液中へのCaの溶出に関する項を表す。

Fig.1にコンクリート溶脱の概念図を示す。地下水に接するコンクリートのセメント水和相から溶出するのは、主として可溶性の水酸化カルシウム (Ca(OH)₂ : 以下CHと表記) と難溶性のカルシウムシリケート化合物 (nCaO・SiO₂・mH₂O : 以下CSHと表記) 中のCaであり、水に溶けやすいCH中のCa、難溶性のCSH中のCaの順に溶出が起こる。

細孔溶液中のCaの飽和濃度(C₀)は、Fig.2に示すように、Bernerがまとめた水和相部分のCaとSiのモル比(以下、C/S比の表記)との関係⁴⁾に基づき、式(2)で表わされる。

$$C_0 = \begin{cases} 20 & 1.8 \leq C/S \\ 30.3C/S - 28.2 & 2 \leq C/S < 1.8 \\ 2 & C/S < 2 \end{cases} \quad [mol/m^3] \quad (2)$$

拡散によって細孔溶液中のCa濃度(C)は低下するが、飽和濃度(C₀)との濃度差分のペースト部分のCaが溶解することにより、Ca濃度が補充されると考える。CHやCSHの溶解速度に関しては十分な知見が得られていないが、細孔溶液中のCa濃度と飽和濃度(C₀)の差に対して、CHではその差の全量が溶解するとし、CSHではその差の1割が計算ステップごとに溶解するとした。また、地下水はCaの濃度が0[mol/m³]の純水と設定し、流速は0[m²/s]で移流は生じないとした。

3. 解析方法

3.1 格子ボルツマン法

Ca溶脱の解析に用いた格子ボルツマン法(Lattice Boltzmann Method:LBM)⁵⁾は、空間を格子点に区切り、拡散体の密度を方向成分に分解した分布関数を定義し、隣接する格子点間のやり取りで拡散を表す解析法である。このため、LBMは有限要素法における大規模な行列の演算を必要とせず、複雑形状の解析が容易であり、計算負荷が大きくなるなどの利点を有する。

3.2 解析モデル

コンクリートは、均質体のモルタルと粗骨材からなる解析モデルとした。モルタルを構成するセメント水和相、細骨材および空隙は均質に存在すると仮定した。空隙は水で充填されており、セメント水和相から溶出したCaの媒質とした。すなわち、空隙量は細孔溶液の容積に相当する。粗骨材は、拡散係数が0[m²/s]の球体と仮定し、Caの拡散に対する障害物となる扱いとした。

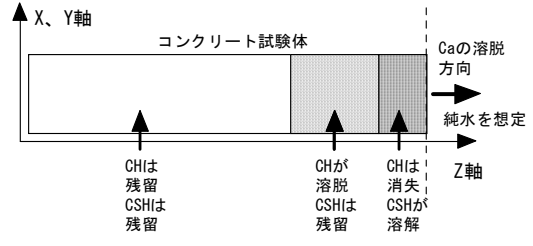


Fig.1 コンクリート溶脱の概念図
Conceptual Diagram of Calcium Leaching

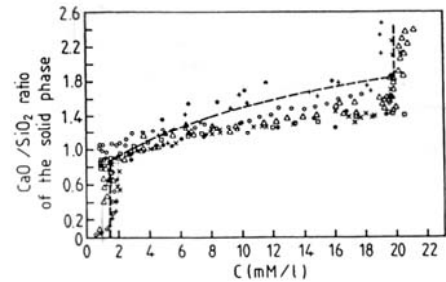


Fig.2 Ca飽和濃度とC/S比の関係⁴⁾
Relation of Saturated Concentration and C/S Ratio

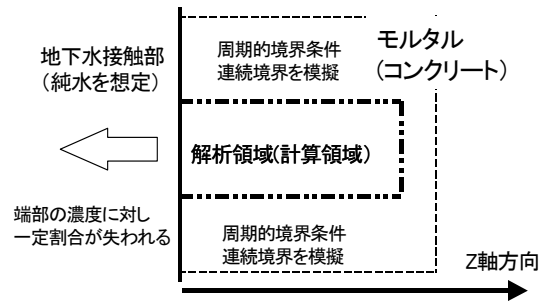


Fig.3 モルタル溶脱のCa解析モデル
Ca Leaching Analytical Model of Mortar

解析領域はFig.3に示すような直方体の領域とした。一方の面を地下水に接する水接面とし、反対の面は材料内部とし、この方向を深さ方向とした。コンクリートが地下水に接する面では、常に濃度0[mmol/l]の外部水にCaが溶出するとし、水接するコンクリート端部において、純水中におけるCaの拡散係数と同等な結果を与えるCaの透過速度を10⁻⁷[m/s]とした。この透過速度は斉藤ら¹⁾の与えた水接部のモルタルの拡散係数と等しくなるように感度解析から求めた。解析領域の水接面に対する反対面では、Caの濃度は常に飽和濃度とした。

地下水に接する方向に水平な面に関しては、相対する端部が接するような周期的境界条件⁶⁾を課し、水平方向は無限の長さを有する条件として。解析領域の深さ方向の長さは、モルタルでは10000年間で溶脱が起こらないと考えられる十分な距離として100cmとし、コンクリートでは解析期間を1000年としたことから50cmとした。

3.3 解析条件

解析条件をTable 1に示す。時間刻みと格子間隔は、計算上安定に採りうる最大値である10000秒および1cmを用いた。モルタルの解析では、深さ方向に水平な方向の格子点数は最小の4点とし、解析期間は1

0000年とした。コンクリートの解析では、粗骨材を考慮するため、水平方向に格子点数を30点とし、計算期間を1000年とした。

4. 解析対象および解析に用いた物性値

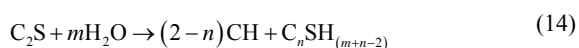
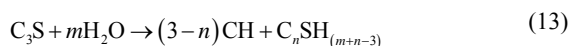
4.1 セメント硬化体

解析対象としたモルタルの配合をTable 2に示す。対象とする検討ケースは、普通ポルトランドセメント(OPC)、ひび割れ低減の観点から低熱ポルトランドセメント(LPC)、さらに低発熱化するために、LPCにフライアッシュ(FA)を加えた結合材(LPC+FA)、低アルカリ化を志向してOPCにボゾランを高含有した低アルカリセメント(HFSC)を用いたモルタルを選定した。いずれも、水結合材比(W/B)を0.45とし、セメント細骨材率(S/B)を2.0とした。コンクリートは、上記モルタルに20mmの単一の粒径の粗骨材が、OPCで0.352m³/m³、LPC+FAで0.387m³/m³、HFSCでは0.343m³/m³の容積で含まれるとした。

4.2 解析に用いた物性値

4.2.1 水和物の種類と生成量 Table 3にCaの供給源であるOPCとLPCの蛍光X線分析法によるセメントの化学成分比を示す。これらの量をBogue式⁷⁾に代入して得られるセメント中のクリンカー鉱物の組成比をTable 4に示す。Bogue式では各化学成分が全量反応すると仮定としており、クリンカー鉱物はエーライト(3CaO・SiO₂・C₃S、分子量228)、ビーライト(2CaO・SiO₂・C₂S、分子量172)、アルミネート相(3CaO・Al₂O₃・C₃A、分子量270)およびフェライト相(4CaO・Al₂O₃・Fe₂O₃・C₄AF、分子量485)から構成される。OPCではC₃Sが多く、LPCではC₂Sが多い。

C₃SやC₂Sは練混水(H₂O)と結合し、式(13)と式(14)に示すように、セメント水和物であるCHとCSHが生成するが、一般に式中のnの値は1.2~2.0の範囲とされる。



本報告では、CHおよびCSH以外の水和物は少量であるため、考慮していない。各配合におけるCHとCSHの量は、Table 2に示す単位セメント量とTable 4に示すクリンカー組成比から単位体積当たりのクリンカー鉱物量を求め、各配合中のCaOとSiO₂の比からnの値を定め、式(13)、式(14)を用いて算出した。OPCやLPCのnの値は、CaO量に対するSiO₂量が少ないために、CSH中のCaOとSiO₂の

Table 1 溶脱解析の解析条件

Leaching Analysis Conditions					
モデル	想定期間	時間刻み	格子点数 (縦・横・深さ)	格子間隔	ステップ数
モルタル	10000年	10000秒	4×4×100	1cm	31536000
コンクリート	1000年	10000秒	30×30×30	1cm	3153600

Table 2 モルタルの配合

配合名	W/B	粉体比			S/B	単位量(kg/m ³)				
		C	SF	FA		W	C	SF	FA	S
OPC	0.45	1.0	0	0	2.0	270	620	0	0	1240
LPC	0.45	1.0	0	0	2.0	293	650	0	0	1301
LPC+FA	0.45	0.7	0	0.3	2.0	245	380	0	163	1440
HFSC	0.45	0.4	0.2	0.4	2.0	268	238	119	238	1190

C:普通ポルトランドセメント(OPC, HFSC)または低熱ポルトランドセメント(LPC, LPC+FA) FA:フライアッシュ(II種相当品) SF:シリカフューム

Table 3 セメントの化学成分比

Chemical Component of Cement					
	CaO	SiO ₂	Al ₂ O ₃	Fe ₂ O ₃	SO ₃
OPC	66.30	22.80	3.80	2.41	2.20
LPC	65.11	26.43	2.29	2.30	2.20

Table 4 セメントのクリンカー鉱物組成比

Mineral Composition of Cement Clinker				
重量(%)	C ₃ S	C ₂ S	C ₃ A	C ₄ AF
OPC	61.21	19.28	6.02	7.33
LPC	39.18	46.31	2.18	6.99

比が最も大きくなるn=2と定めた。

OPCにおけるCHおよびCSH量の算出の過程を以下に示す。OPCモルタルの単位セメント量620[kg/m³]にクリンカー組成比を乗じて、C₃SおよびC₂Sの単位重量は380および120[kg/m³]と得る。それぞれの分子量から、C₃SおよびC₂Sの1m³当たりのモル数は1.67および0.70[mol/m³]となる。式(13)、式(14)中のnを2とすると、1m³当たりのC₃Sから1.67[mol/m³]のCHとCSHが生じ、C₂Sから0.7[mol/m³]のCSHが生じる。LPCも同様に求めた。

LPC+FAに関しても、OPCと同様な方法でCHやCSHの量を求めたが、CHの一部がFAとボゾラン反応を起こしてCSHに変化するとした。FAのボゾラン反応に関する既往の研究⁸⁾によると、ペースト試験体の溶出試験の結果から、LPC+FAを用いた場合、6%程度のCHがボゾラン反応でCSHに変化したとの報告があることから、本報告においてもCHの6%がCSHに変化すると仮定すると、1m³当たりCHが0.61[mol/m³]、CSHが1.68[mol/m³]生成することになる。

HFSCに関しては、C₃S、C₂Sは、いずれも0.8[mol/m³]となるが、nの値はSFやFA由来のケイ素成分も多く存在す

ることからCSH中のカルシウムの量を一番少なくする1.2と仮定した。式(13), 式(14)より, C₂SからはCHが0.64[mol/m³]とCSHが0.8[mol/m³]生じ, C₃SからはCHが1.44[mol/m³]とCSHが0.8[mol/m³]を生じる。このうちCHがCSHに変化すると, C₃SからのCHは1.2[mol/m³]のCSHに変化し, C₂SからのCHは0.53[mol/m³]のCSHに変化する。これらを合計すると, HFSCのCH量は0, CSH量は3.33[mol/m³]となる。

溶脱解析に必要となるのは, 各モルタルにおけるCHとCSHの単位体積当たりのモル数である。式(13)および式(14)では, nの値を定めればmの値を決めなくてもクリンカー鉱物から生成されるCHおよびCSHの量は定まる。これらの計算過程を経て求めた各配合のCHとCSH量をTable 5に示す。

4.2.2 モルタルの空隙率 安田ら⁹⁾によるW/Bが40~125%のモルタルの空隙量の測定結果によると, W/C=45%, S/Bが1.5のモルタルの空隙率は約15%と推定され, FAを重量比で30%置換した場合もほぼ変わらないとしている。また, Numataら¹⁰⁾はW/C=45%でS/C2.02の普通ポルトランドセメントの材齢28日での空隙率は11%程度と報告している。これらの結果を考慮して, 本報告ではOPC, LPC, LPC+FAおよびHFSCを用いたモルタルの空隙率を13%とした。

4.3.3 Caの拡散係数 拡散方程式に用いる拡散係数(D)は, 式(15)で示され, 溶脱に伴うCHの残存量に応じて変化し, CSHの量に依らないとした。すなわち, CSHの溶解に伴う拡散係数の変化は生じないものとした。式(15)中にけるD₀は未溶脱部の拡散係数, D₁は溶脱部の拡散係数, C_xは初期のCH量, CH_iは各要素における残存CH量[mol/m³]を表す。

$$D = D_0 + (D_1 - D_0) \cdot (1 - CH_i / CH_x)^2 \quad (15)$$

OPCモルタルの拡散係数は, Builらの報告¹¹⁾によると, 様々なW/Cでのコンクリートの未溶脱部では1.0×10⁻¹³[m²/s]のオーダーとされていることから, 保守的な設定とし1.0×10⁻¹²[m²/s]とした。溶脱部では, 斉藤らの解析結果¹⁾から, 1.0×10⁻¹⁰[m²/s]とした。LPCモルタルの拡散係数は, 未溶脱部ではOPCと同じく1.0×10⁻¹²[m²/s]としたが, 溶脱部ではCH(比重2.24)の占める体積が, OPCの55%程度であることから, 拡散係数の増加も小さいと考え, OPCに対するLPC中のCHの体積比率を乗じて5.5×10⁻¹¹[m²/s]と仮定した。LPC+FAモルタルでは, 加藤らの拡散係数と空隙量との相関に関する研究結果¹²⁾では, 混和材の存在は拡散係数を小さくすることが報告されていることより, 未溶脱部の拡散係数をFAの体積分(0.3)をOPCの拡散係数から減じた0.7×10⁻¹²[m²/s]とし, 溶脱部でもCHの体積分を減じて0.39×10⁻¹⁰[m²/s]とした。HFSCモルタルは, C

Table 5 溶脱解析の物性値

Physical Properties of Leaching Analysis

硬化体名	単位容積質量 [kg/m ³]	CHモル量 [mol/m ³]	CSHモル量 [mol/m ³]	初期C/S	空隙率 (%)	W/C	未溶脱部拡散係数 [m ² /s]	溶脱部拡散係数 [m ² /s]	透過速度 [m/s]
OPC	2.14	1.67	2.36	2.0	13	0.45	1.0×10 ⁻¹²	1.0×10 ⁻¹⁰	10 ⁻⁷
LPC	2.24	0.92	2.40	2.0	13	0.45	1.0×10 ⁻¹²	0.55×10 ⁻¹⁰	10 ⁻⁷
LPC+FA	2.41	0.61	1.68	2.0	13	0.45	0.7×10 ⁻¹²	0.39×10 ⁻¹⁰	10 ⁻⁷
HFSC	2.05	0.0	3.33	1.2	13	0.45	1.0×10 ⁻¹²	1.0×10 ⁻¹²	10 ⁻⁷

Hを含まないことから, 未溶脱部と溶脱部の両者の拡散係数は, OPCの未溶脱部と同じ1.0×10⁻¹²[m²/s]とした。

4.3.4 コンクリートの遷移帯 既往の研究によれば, モルタルと粗骨材の界面に存在する遷移帯の幅は1.0×10⁻⁵m~1.0×10⁻⁴mと報告されているが^{9), 13)}, このような微小な領域における空隙量を測定することは困難であるため, 遷移帯部分でどれほどの拡散係数の増加があるのかは不明である。本報告では, 遷移帯の部分の拡散係数を遷移帯に属さない領域の値の10倍と仮定し, これを考慮して, この部分の格子点では拡散係数を増大した。遷移帯を有する格子点の拡散係数は, 格子間隔の1cmとの比例配分でその場所の拡散係数の1.001倍とした。

5. 解析結果

5.1 モルタルの溶脱

水と接触して10000年経過後のモルタルに残留するCSH中のC/S比をFig.4に示す。CHが消失しCSHからCaが溶出している領域を溶脱域とした。Fig.4では, 初期にCHを含むOPC, LPC, LPC+FAとCHを含まないHFSCでは, C/S比の分布に大きな違いが見られる。初期のC/S比が2.0のOPC, LPCおよびLPC+FAのモルタルでは, 溶脱の開始に伴い, C/S比が1.4~2.0の区間で急速に減少し, 0.9~1.4の区間でなだらかに減少し, 0.9以下でまた急激に減少する結果となった。初期のC/S比が1.2のHFSCでは, C/S比が0.9以上の区間でなだらかに減少した。これらのC/S比の分布の相違の理由としては, CHの存在するモルタルでは, CHの溶解が終わるまでは, さらに深い場所でのCaの溶解は抑制されるが, CHが存在しないHFSCでは, 溶解度の低いCSHからCaが溶出するため, 深さ方向のC/S比の急激な変化は見られないものと考えられる。

また, それぞれのモルタルの溶脱状態は, Fig.2および式(2)に示すようにC/S比とCa飽和濃度との関係に大きく依存することが確認された。

Fig.5に10000年後のモルタルの溶脱域の深さ(以下, 溶脱深さと記述)を示す。10000年後の溶脱深さは, OPCでは64cmであるが, LPCでは55cmとなり, OPCに比べて10cm程度小さくなった。これは, LPCの溶脱部の拡散係数が小さいためと考えられる。LPC+FAでは, 溶脱深さは63cmとOPCと同等と予測される。FAは, ポズラン反応とセメントの体積分率の低下のために拡散係数を小さくす

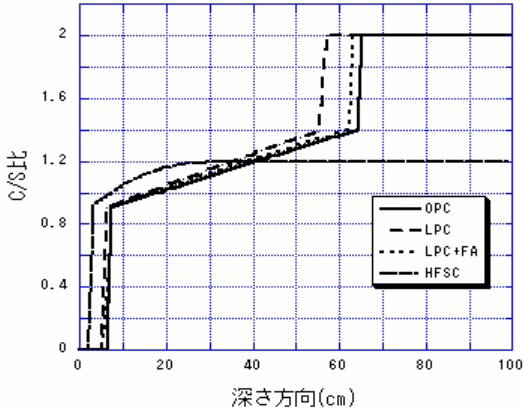


Fig. 4 10000年後のCSHのC/S比
C/S Ratio of CSH at 10000 Years

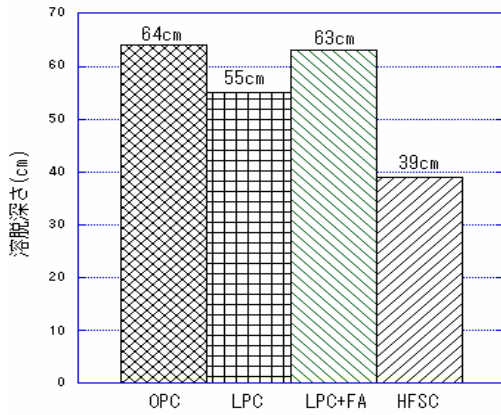


Fig. 5 10000年後の溶脱深さ
Leaching Width of Mortar at 10000 years

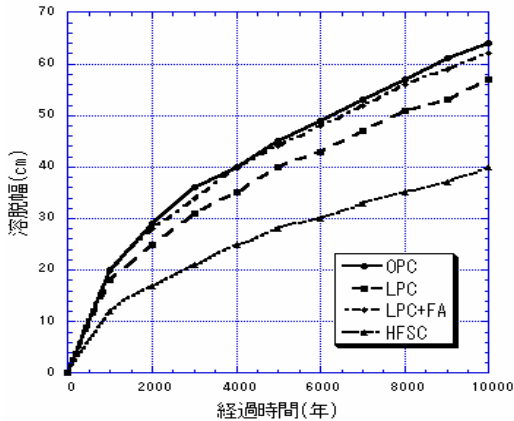


Fig.6 溶脱深さの経時変化
Variations with Time of Leaching Front

ること溶脱が進行しなくなる作用と、CHやCSHの絶対量が少なくなり溶脱が進む作用があるためと考えられる。

HFSCモルタルの10000年後の溶脱深さは 39cmと予測され、他のモルタルに比べ小さい結果となった。これは、溶脱によって拡散係数の変化がないと仮定したためである。

次に、各モルタルの溶脱深さの経時変化をFig.6に示す。いずれのモルタルの溶脱深さの経時変化も、時間の平方

Table 6 溶脱幅フィッティング結果

Ratio of Chemical Compound of Cement				
モルタル	OPC	LPC	LPC+FA	HFSC
α	0.6387	0.5633	0.6230	0.3923

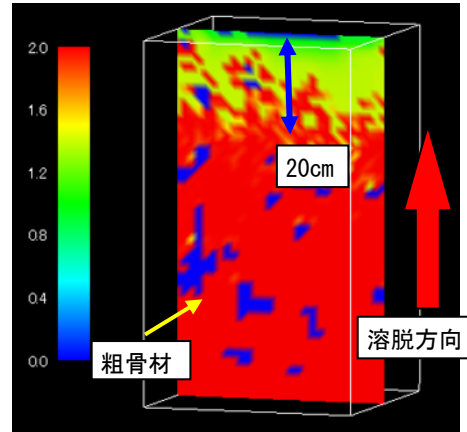


Fig.7 1000年後のOPCコンクリートの溶脱解析結果
Result of Leaching Simulation of OPC Concrete

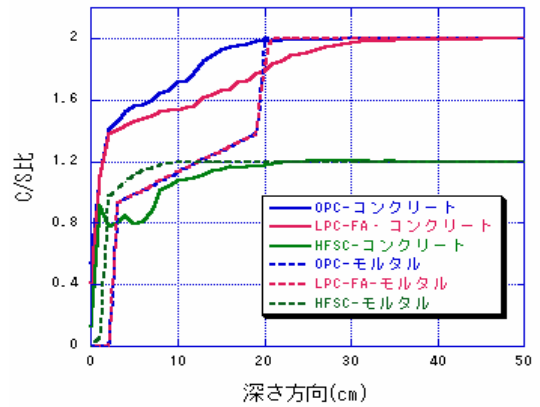


Fig. 8 コンクリートのCSHのC/S比の解析結果
Analysis Result of C/S Ratio of Concrete

根の関数でよく近似され、溶脱幅 W (cm)は、経過年数 t (年)を用いて、式(16)で示すことが可能である。モルタルごとに求めた係数 α をTable 5に示す。相関係数は極めて1に近く、いずれも近似精度が高い結果となった

$$W = \alpha \times \sqrt{t} \quad (16)$$

Caが消失してC/S比が0となる深さ、OPCで6cm、LPCおよびLPC+FAで5cm、HFSCで2cmとなった。この結果は、溶脱部の拡散係数の値が影響していると考えられる。

モルタルの溶脱に対する抵抗性は、溶脱深さの比較によると、HFSCが優れており、次いでLPC、LPC+FA、OPCの順となった。HFSCは溶脱による、深さ方向のC/S比の低下割合の変化が緩やかとなった。

5.2 コンクリートの溶脱

粗骨材を考慮したコンクリートの溶脱予測解析を OPC,LPC+FAおよびHFSCについて実施した。1000年後の OPCコンクリートのC/S比をFig.7に示す。上方が水接面で、青色の領域が粗骨材を表しているが、溶脱程度の指標であるC/Sの分布は、粗骨材や遷移帯の影響により、不均一となっていることが判る。

また、1000年後のコンクリートのC/S比の平均値の分布をFig.8に示す。図中には比較のために、1000年後のモルタルのC/S比も示している。OPCコンクリートの溶脱深さは、OPCモルタルとほぼ同等であるが、LPC+FAコンクリートの溶脱深さは30cm程度と予測され、LPC+FAモルタルの20cmに対して大きくなった。HFSCコンクリートにおいても、溶脱深さは20cm程度と予測され、HFSCモルタルの15cmに比べ大きく予測された。FAやSFを含むコンクリートでは、モルタルに比べて溶脱深さが広がる結果となった。

コンクリートのC/S比の分布をモルタルとC/S比と比較すると、OPCコンクリートやLPC+FAコンクリートでは、C/S比が2.0程度の位置においてC/S比が急激に減少する区間はなく、緩やかに減少する傾向が見られた。

これらは、コンクリート中の粗骨材自体の存在の影響の他に、粗骨材周りに存在する遷移帯も影響していると考えられる。

6. まとめ

放射性廃棄物処分場への適用が検討されている材料・配合を用いたモルタルに対し10000年、コンクリートに対し1000年の溶脱解析を実施し、以下の結果を得た。

- 1) モルタルの溶脱深さをCSHのC/S比が減少している範囲の幅とした場合、HFSCが39cmと最も小さく、次いでLPCの54cm、LPC+FAの63cm、OPCの64cmの順に大きくなった。
- 2) モルタルの10000年の溶脱解析を実施した結果、いずれの結合材を用いたモルタルにおいても、溶脱深さは時間の平方根の関数で予測することが可能である。
- 3) CHを含まないHFSCモルタルおよびコンクリートでは、溶脱に伴う拡散係数の増大が無いためCSHのC/S比の低下が始まる範囲は狭くなり、初期のC/S比が低いためその減少割合は小さくなった。
- 4) 粗骨材を考慮したコンクリートの1000年後の溶脱深さは、モルタルの溶脱深さと比較して、OPCでは同等であるが、LPC+FAやHFSでは大きくなった。また、OPCやLPC+FAでは、深さ方向のC/S比の減少割合の変化は小さくなった。

参考文献

- 1) 齊藤裕司, 他: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.1, No.1, pp.51-59, 2000.1
- 2) Inamuro,T., et al. : A Lattice Boltzmann Method fo a Binary Miscible Fluid Mixture and Its Application to a Heat-Transfer Problem, J. Comp. Phys., Vol.179, pp.1-15, 2002
- 3) 嶋毅, 他:コンクリート中の物質移行に対するLBMの適用への基礎的検討, コンクリート工学年次論文報告集, Vol.23, No.2, pp817-822, 2001
- 4) Berner U.R.:Evolution of Pore Water Chemistory During Degradation of Cement in a Radioactive Waste Repository Environment, Waste Management, Vol.12, pp.201-219,1992.
- 5) Yoshino, M., Iet al.: Lattice Boltzmann Simulations for Heat/mass Transfer Problems in a Three-dimensional Porous Structure, Int. J. Numer. Meth. Fluids, Vol.43, pp.183-198, 2003
- 6) 堂山昌男 他:計算材料科学, 海文堂, pp.6, 1987
- 7) 荒井康夫:セメントの材料化学(改訂2版), pp110-113, 2002
- 8) 横関康祐:コンクリートからの成分溶出を対象とした千年レベルの長期耐久性設計に関する研究, 博士論文, pp.132, 2004 C&C エンサイクロペディア, セメント協会編, pp19-21, 1996
- 9) 安田和弘, 他:カルシウム溶脱に伴うコンクリートの物性性能および物質移行性能の変化に関する検討, Cement Science and Concrete Technology, No.56, pp.492-498, 2002
- 10) Numata, S., et al.:Diffusion of Tritiated water in Cement Materials, J. Nuc. Mat., 171, pp.373-380, 1990
- 11) Buil, M., et al.: A Model of th Attack of Pure Water or Undersaturated Lime Solutions on Cement, Stabilization of Hazardous, Radioactive and Mixed Wastes, Vol.2, pp.227-241, 1992
- 12) 加藤佳孝, 他:構成材料の空間的特性を考慮したコンクリートの有効拡散係数の予測モデル, コンクリート工学論文集, Vol.16, No.1, pp.11-21, 2005
- 13) C&C エンサイクロペディア, セメント協会編, pp.113-115, 1996