

論文 セメント系材料からの成分溶脱解析における水和物の沈殿と境界条件の影響

取達 剛^{*1}・武地 真一^{*1}・横関 康祐^{*2}・大即 信明^{*3}

要旨: 著者らがこれまでに提案してきたセメント系材料からの成分溶脱解析手法の改良を目的として、室内実験によって得られたセメントペーストの溶脱試験結果を解析的に評価した。その結果、セメント系材料からの水和物の溶脱を評価する際には、その境界条件の設定方法が重要であることがわかった。さらに、供用後 70 年経過した実構造物の調査結果の検証解析を行い、境界条件の設定だけでなく、C-S-H の溶脱に伴う SiO₂ の沈殿の取り扱いを改良した本解析手法が実験や実構造物の調査結果を精度よく表現できることがわかった。
キーワード: 溶脱, 沈殿, Ca(OH)₂, C-S-H, SiO₂, 境界条件

1. はじめに

セメント系材料を放射性廃棄物処分施設へ適用する動きがあり、様々な研究が行われている¹⁾。放射性廃棄物処分施設には数千年から数万年にわたる超長期耐久性が必要と考えられている。また、同施設は地中 100m 以深への建設が予定されていることから、中性化や塩害劣化は生じる可能性が低く、主たる劣化のひとつとして、セメント系材料からの成分溶脱が考えられている。

著者らはこれまでに、コンクリート中のイオンの移動および溶脱現象を数値解析的に評価する手法を考案し²⁾、供用後 50~100 年を経過した実構造物調査結果との比較、検証を行い、その精度について検討を行ってきた³⁾。本検討では、同解析手法の改良を目的として、W/C の異なるセメントペーストのイオン交換水への浸漬試験を行った結果を示すとともに、同実験を数値解析的に評価し、解析手法の改良点について言及した。また、供用後 70 年が経過した実構造物との比較解析を行い、改良した解析手法の妥当性について検討を行った。

2. セメントペーストの浸漬試験

2.1 試験概要

水セメント比の異なるセメントペースト(40×40×160mm)を作製し、所定の期間養生後に中心部から 20×20×20mm の立方体をドライカッターによって切り出した。切り出した供試体を供試体重量に対して 20 倍のイオン交換水に浸漬した。浸漬期間は 12 週, 21 週および 44 週とし、浸漬期間中の液交換は行わず、1 週間に 1 回作用水の攪拌を行うのみとした。浸漬終了後に供試体を取り出し、後述する各種分析を行った。

2.2 使用材料および配合

使用材料として、セメントには研究用ポルトランドセ

表-1 使用したセメントの化学組成 (mass%)

lg.Loss	Insol.	SiO ₂	Al ₂ O ₃	Fe ₂ O ₃
0.62	0.04	21.24	5.24	2.51
CaO	MgO	SO ₃	Na ₂ O	K ₂ O
64.86	1.84	2.02	0.23	0.54

メント (密度 3.17g/cm³, 比表面積 3,150cm²/g) を、練混ぜ水にはイオン交換水を使用した。使用したセメントの化学組成を表-1 に示す。配合は、W/C=40, 55, 85% の 3 配合とした。

2.3 練混ぜおよび養生

練混ぜは、温度 30℃, 相対湿度 60%RH の恒温恒湿室にてモルタルミキサを用いて行った。その後、30℃, 80%RH の恒温恒湿室にて 30 分間隔で練返しを行い、ブリーディングがなくなりかけた頃に 40×40×160mm の鋼製型枠に打設した。前養生として 30℃, 80%RH の環境にて 1 日間封緘養生を行った後、40℃の恒温槽にて材齢 56 日まで促進水中養生を行った。

2.4 試験項目

浸漬終了後の供試体を切断し、EPMA による元素分析を行った。EPMA の測定元素は Na, K, Ca, Si の 4 元素とした。また、作用水中の Ca²⁺濃度を JIS K 0101 に準拠して測定した。

2.5 試験結果

EPMA によって得られた、W/C=55%における浸漬 12, 21, 44 週後の固相 Ca および Si 濃度分布を図-1 に示す。これによると、浸漬期間の増大に伴って水和物の変質が深部まで進む結果となったが、Ca 濃度が低下しはじめる深さ(Ca 変質深さ)の差は 0.2mm 程度であり、浸漬 44 週における Ca 変質深さは 1mm 程度、Si 変質深さは最大 0.4mm 程度であった。図-2 には、各 W/C における浸漬

*1 鹿島建設技術研究所 土木材料グループ 工修 (正会員)

*2 鹿島建設技術研究所 土木材料グループ 上席研究員 博士(工学) (正会員)

*3 東京工業大学大学院 理工学研究科 国際開発工学専攻 教授 工博 (正会員)

期間と Ca 変質深さの関係を示した。これによると、配合によって若干のばらつきはあるものの、Ca 変質深さは、W/C や浸漬期間によらず 0.6~1.1mm であり、明確な差は見られなかった。

図-3 には、各 W/C における浸漬期間と Si 変質深さの関係を示した。これによると、本試験においては、配合によらず、Si はほとんど変質しない結果となった。また、いずれの W/C においても、浸漬 44 週における Si 変質深さの方が、浸漬 12 週における変質深さに比べて小さい結果となった。芳賀らの行った C₃S ペースト硬化体の浸漬試験⁴⁾において、Ca(OH)₂ の溶脱のあとに Type I の C-S-H が生成して若干空隙を埋めるような傾向が確認されていることから、本試験でも同様の現象が生じて Si が表面に再沈殿したものと推察した。

以上のことから、作用水の交換をしていない本試験では、作用水中の Ca²⁺濃度が比較的早い段階で上昇し、Ca や Si を含む水和物がセメントペーストの細孔中に沈殿したものと考えられる。すなわち、水和物の溶脱の評価にあたっては、Ca(OH)₂ の溶脱、C-S-H の溶脱に加えて、C-S-H および SiO₂ の沈殿の影響が重要であると考えられる。

3. 数値解析による物質移行評価

3.1 解析モデルの概要

著者らがこれまでに開発してきた物質移行に関する数値解析モデルは、セメント系材料中のイオンの拡散、移流の影響、電気的中性条件、およびセメント系材料からの Ca 溶脱に伴う物質移行特性の変化を考慮できる^{2),3),5)}。モデルの詳細を以下に示す。

3.2 物質移行特性のモデル化

(1) 質量保存則

基礎方程式は、Ca イオンに関する質量保存則であり、以下の式によって表される。

$$\frac{\partial(\phi \cdot C_i)}{\partial t} = \frac{\partial}{\partial x} \left(D_{eff}^i \cdot \frac{\partial C_i}{\partial x} \right) - \frac{\partial}{\partial x} (u_i \cdot C_i) - \frac{\partial}{\partial x} (u_d \cdot C_i) + Q_i \quad (1)$$

ここに、C_i : 細孔溶液中のイオン種 i の濃度(mol/L), φ : 空隙率, D_{eff}ⁱ : イオン種 i の有効拡散係数(m²/s), u_i : イオン種 i の電気泳動力による移動速度(m/s), u_d : ダルシー流速(m/s), Q_i : イオン種 i の単位時間・単位体積あたりの溶出量である。

(2) 拡散によるイオンの移動モデル

本解析モデルにおいては、水溶液中でのイオンの移動を電気泳動理論、すなわち、Nernst-Planck 式を基本とし、Debye-Hückel 理論による濃度の影響、空隙の屈曲や骨材・遷移帯の影響、溶出に伴う空隙増加を考慮した式(2)に示す有効拡散係数 D_{eff}ⁱ 算定式によって算出した。

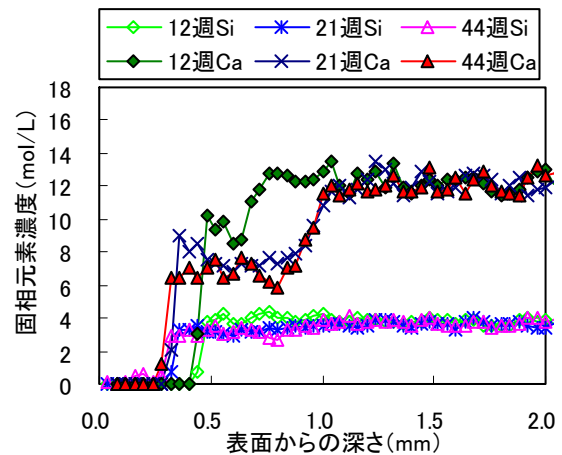


図-1 浸漬後の固相元素濃度分布(W/C=55%)

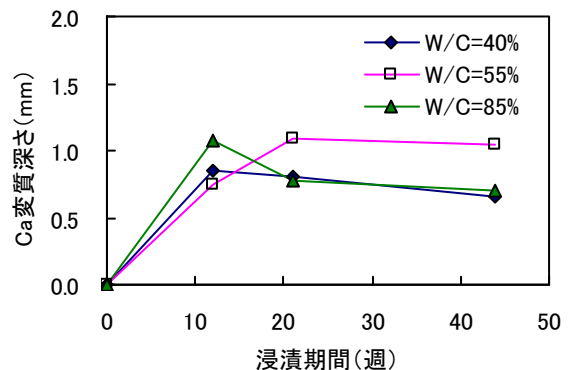


図-2 浸漬期間と Ca 変質深さの関係

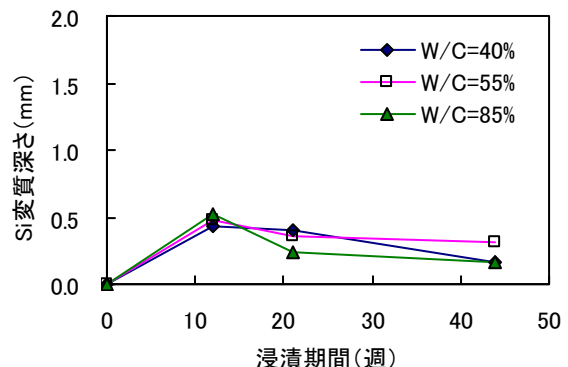


図-3 浸漬期間と Si 変質深さの関係

$$D_{eff}^i = \eta \cdot \beta \cdot f(\phi) \cdot D_0^i \quad (2)$$

ここに、η : 吸着などによる低減係数, β : 骨材の影響による低減係数, f(φ) : 空隙の屈曲による低減係数である。

$$\beta = \frac{1-c \cdot G_{vol}}{1-d \cdot S_{vol}} \cdot P_{vol} \quad (3)$$

ここに、G_{vol} : コンクリート中の粗骨材体積比(m³/m³), S_{vol} : コンクリート中の細骨材体積比(m³/m³), P_{vol} : コンクリート中のペースト体積比, c, d : 骨材による係数である。骨材による係数については、既往の研究⁶⁾を参考に c=1.5, d=0.86 と設定した。

$$f(\phi) = 0.001 + 0.07 \phi^2 \quad (\phi \leq 0.18) \\ = 0.001 + 0.07 \phi^2 + 1.8(\phi - 0.18)^2 \quad (\phi > 0.18) \quad (4)$$

D_0^i : イオン種 i の水溶液中での拡散係数(m²/s)

$$D_0^i = a^i \cdot \exp\left(-b^i \cdot \frac{1}{T}\right) \quad (5)$$

ここに, a^i , b^i : イオン種ごとの定数, T : 絶対温度 (K)である。

(3)空隙率のモデル化

空隙率の算出については以下のように設定した。

$$\phi_{total} = \phi_{cap} + \phi_{gel} + \phi_{leach} \quad (6)$$

ここに, ϕ_{total} : 全空隙率, ϕ_{cap} : キャピラリー空隙, ϕ_{gel} : ゲル空隙, ϕ_{leach} : 溶脱によって生成される空隙である。 ϕ_{cap} および ϕ_{gel} については, T.C.Powers の提唱したモデル⁷⁾を参考に, 以下の式によって求めた。

$$\phi_{cap} = \frac{W/C - 0.36 \cdot F}{W/C + 0.32}, \quad \phi_{gel} = \frac{0.19 \cdot F}{W/C + 0.32} \quad (7)$$

ここに, F : 水和度, W/C : 水セメント比である。

3.3 セメント系材料の化学的変質のモデル化

本解析モデルにおけるセメント系材料の化学的変質のモデル化は, Ca の溶解平衡関係を基本としている。

(1)Ca の溶解平衡

本解析モデルでは, Ca の溶解平衡関係を図-4 のようにモデル化しており, 3つの状態に分類している。

a. Na⁺, K⁺の影響を受けながら Ca(OH)₂ 中の Ca が溶解する状態

b. Ca(OH)₂ の溶解が終了し, C-S-H が溶解する状態

c. C-S-H が SiO₂ になり, 急激に Ca が溶解する状態

a. について, Na⁺ および K⁺ の影響を受けながら Ca(OH)₂ が溶解するとモデル化しているため, 図-4 中の C_{0Ca} は計算によって求めるものであり, 条件によって異なり, Ca(OH)₂ の溶解度積から得られる値とは差異が生じる。

b. については, C-S-H 溶出が急激に進行する液相 Ca²⁺ 濃度(C_{1Ca})が 0.0015mol/L になる C_{p2Ca} を以下の式で求め, C_{0Ca} から C_{1Ca} へある傾きを持って直線的に溶解する固液平衡関係を設定している。

$$C_{p2Ca} = C_{p0Ca} \cdot A_{cp1} \cdot \left(\frac{C_{1Ca}}{C_{0Ca}}\right)^{1/n} \quad (8)$$

ここに, C_{p2Ca} : C-S-H 溶出が急激に進行する固相 Ca 濃度(mol/L), C_{p0Ca} : 単位セメントペーストあたりの初期固相 Ca 濃度(mol/L), C_{p1Ca} : C-S-H 溶出開始時の固相 Ca 濃度 (= $A_{cp1} \cdot C_{p0Ca}$), A_{cp1} : C-S-H 溶出に関する係数 (=0.81²⁾), C_{0Ca} : Ca(OH)₂ 溶出時の液相 Ca²⁺濃度(mmol/l), C_{1Ca} : C-S-H 溶出が進行する液相 Ca²⁺濃度(=0.0015mol/l²⁾), n : C-S-H 溶出に関する係数(-)である。

(2)Na, K の溶解平衡

Na⁺, K⁺の平衡濃度が固相 Ca 濃度と高い相関があることを実験によって確認しており²⁾, 液相中の Na⁺ および K⁺の平衡濃度を固相 Ca 濃度の関数として扱った。

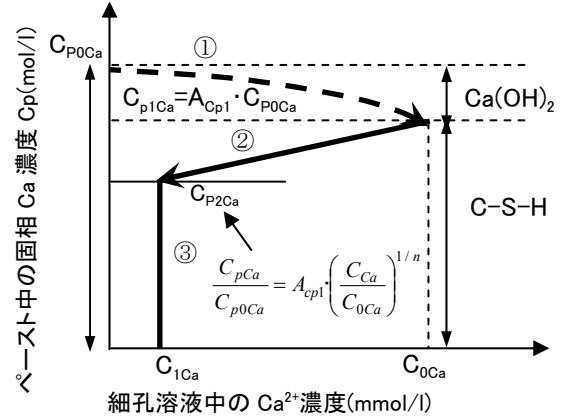


図-4 溶解平衡関係の概念図

0.97 < ε ≤ 1 のとき

$$[Na^+] = \frac{(C_{0Na} - 6.43 \cdot 10^{-4})\varepsilon + (6.43 \cdot 10^{-4} - 0.97 \cdot C_{0Na})}{0.03}$$

$$[K^+] = \frac{(C_{0K} - 8.94 \cdot 10^{-4})\varepsilon + (8.94 \cdot 10^{-4} - 0.97 \cdot C_{0K})}{0.03} \quad (9)$$

ε ≤ 0.97 のとき

$$[Na^+] = 10^{-7} \cdot \exp(9.04\varepsilon)$$

$$[K^+] = 10^{-7} \cdot \exp(9.38\varepsilon) \quad (10)$$

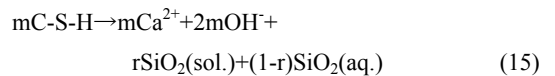
ここに, $[Na^+]$: Na⁺の平衡濃度(mol/l), $[K^+]$: K⁺の平衡濃度(mol/l), ε: 固相 Ca 濃度/初期固相 Ca 濃度(C_{pCa}/C_{p0Ca}), C_{0Na} : 初期 Na⁺濃度(mol/l), C_{0K} : 初期 K⁺濃度(mol/l)である。

3.4 変質に伴う物質移行特性の変化のモデル化

本解析モデルでは, 水和物の溶脱に伴う体積変化によって空隙率が変化し, 拡散係数が変化することとした。

$$\phi_{leach} = \sum_{i=1}^{nsol} Vh_i \cdot (C_{p0i} - C_{pi}) \quad (11)$$

ここで, $nsol$: 水和物の総数(種類), Vh_i : 水和物のモル体積(l/mol), C_{p0i} : 水和物 i のペースト中の濃度初期値(mol/l), C_{pi} : 水和物 i のペースト中の濃度(mol/l)である。本解析モデルにおいて考慮する水和物は NaOH, KOH, Ca(OH)₂, C-S-H, SiO₂ であり, 以下の反応式によって水和物の溶脱を表現している。



ここで r は SiO₂ 残留率であり, $r=0$ のときは C-S-H はすべて溶解し, $r=1$ のときは C-S-H が溶解しても SiO₂ がすべてその場に残留すると設定した。

4. 浸漬試験結果の検証解析

セメントペーストの浸漬試験結果と、3章で述べた解析手法による数値解析結果との検証を行った。検証解析に用いる入力条件を表-2に示す。環境温度は20℃とした。また、解析はセメントペーストのみを解析要素とし、解析領域は20mm、1次元で解析した。ここでは、表-3に示すように、解析における境界条件およびSiO₂の沈殿の有無に着目して3ケースの解析を行った。

4.1 境界条件の影響評価

浸漬試験では作用水の液交換を行わなかったため、作用水中のイオン濃度の上昇に伴って変質が緩やかになったと考えられる。そこで、環境条件の設定が解析結果に及ぼす影響を評価した。境界条件として、表-3のうち、各イオンの濃度をすべて0mmol/Lと固定したケース1と、溶脱したイオンが経時的に境界に蓄積され、ペースト中の細孔溶液と作用水のイオン濃度が平衡状態になるまで境界濃度が上昇するケース2の2ケースで比較した。ここで、ケース2における左端境界イオン濃度の計算式は以下によるものとした。

$$\alpha_{it} = \alpha_{i0} + c \int \text{flux} \cdot dt \quad (16)$$

ここに、 α_i :時刻*t*における固定境界のイオン*i*の濃度 (mmol/l), α_{i0} :初期イオン濃度(=0), c :イオン濃度定数 (=0.005), $\int \text{flux} \cdot dt$:境界におけるイオンフラックスの積算値(mmol/m²)である。イオン濃度定数は液固比に応じて設定する数値である。液固比20の場合、1m×1m×0.2m=0.2m³の領域に1mmol/m²のフラックスが流れ込むときに上昇する濃度は1mmol/0.2m³=0.005mmol/lとなる。そこで、 $C=0.005$ と設定した。

境界条件の異なる2つのケースにおける、W/C=40%、浸漬44週における固相Ca濃度の解析結果、およびEPMAから得られる固相Ca濃度の実測値を図-5に示す。境界濃度を0mmol/Lに固定したケース1の場合、実測値に比べて解析結果のほうが大きく変質する結果となった。一方、イオンが蓄積する境界条件とすることで、実測値を解析で精度よく表現できた。また、2つのケースにおけるW/C=55%、浸漬12週および44週における固相Ca濃度の解析結果および実測値を図-6に示す。イオンが蓄積する境界条件とすることで、浸漬12週以降の変質に差がなくなり、解析結果は実測値を精度よく表現できているものと考えられる。以上より、解析条件を適切に設定することで、Ca変質深さを解析によって精度よく表現できることを示した。

4.2 C-S-H 溶脱およびSiO₂沈殿の影響評価

既往の研究において、水和物の溶脱のうち、Ca(OH)₂の溶脱に伴う空隙率の変化のみ考慮することで、物質移行特性の変化を表現できるとの知見が得られている⁸⁾。

表-2 室内試験の検証解析に用いる入力条件

W/C(%)	40	55	85
Ca(OH) ₂ の溶解度積 Ksp(mol/l) ²	4.5 × 10 ⁻⁵		
C-S-Hに関する係数 Acp1	0.81		
C _{1ca} (mmol/l)	1.50		
C _{p2ca} (mol/l)	7.36	6.07	4.51
水和物のモル体積(l/mol) NaOH:0.0188, KOH:0.0275, Ca(OH) ₂ :0.0331, C-S-H:0.0788, SiO ₂ :0.0247			

表-3 解析ケース

ケース	境界条件	SiO ₂ の沈殿
1	固定(0mmol/l)	無(r=0)
2	式(16)によって濃度増加	無(r=0)
3	式(16)によって濃度増加	有(r=1)

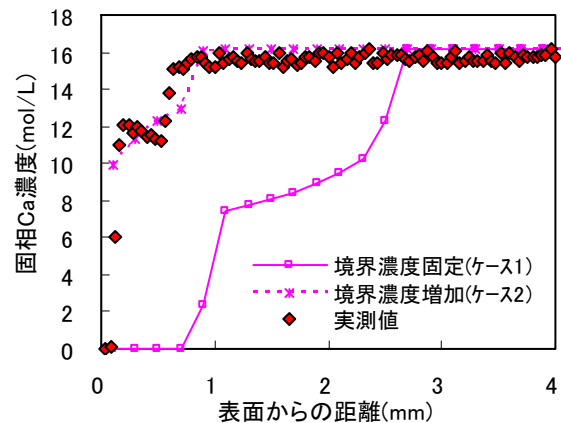


図-5 固相Ca濃度の解析結果および実測値 (W/C=40%, 44週)

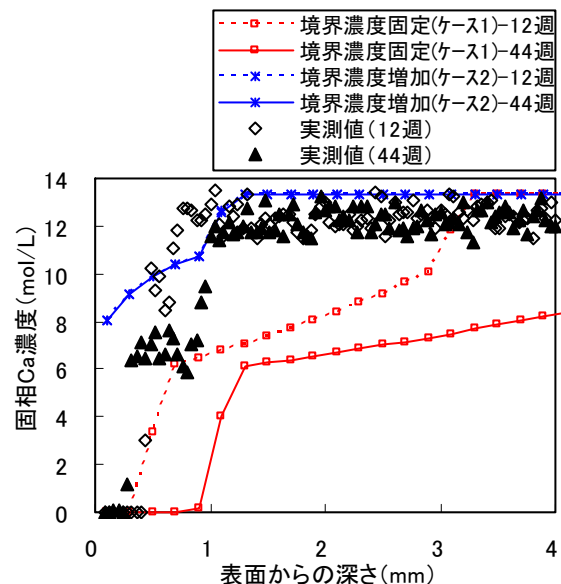


図-6 固相Ca濃度の解析結果および実測値 (W/C=55%, 12週および44週)

これは、C-S-Hの溶脱によって生じた空隙が、吸水膨張したSiO₂によって充填されたためと考えた。そこで、C-S-Hの溶脱およびSiO₂の沈殿に関する影響評価を行っ

た。比較の対象としては、表-3 におけるケース 2 と、C-S-H 溶脱後に SiO₂ が空隙を充填する (式(15)における r=1 と設定) ケース 3 の 2 ケースとした。ここで、SiO₂ は吸水性を有していることが広く知られているため、SiO₂ の吸水による空隙の充填について次のような設定を行った。一般的な乾燥剤として用いられるシリカゲルは最大で自重の 80% 程度吸水することが知られている。これは SiO₂ 1mol に対して 2.7mol の H₂O が吸水される計算となることから、C-S-H の溶脱によって生じたシリカ分子が、SiO₂·2.7H₂O (モル体積 0.0713L/mol と設定) として沈殿することとした。

W/C=40%、材齢 44 週における固相 Ca 濃度の解析結果および実測値を図-7 に、固相 Si 濃度の解析結果および実測値を図-8 に示す。図-7 において、SiO₂ が再沈殿する設定としたケース 3 は、空隙が充填されるため、ケース 2 に比べて Ca の変質が若干抑制される結果となったが、その差はわずかであった。一方、図-8 において、固相 Si 濃度の実測値は、ごく表面のみ濃度が低下しており、0.2mm より内部の濃度はほぼ一定となっている。実際には、Ca/Si 比の低い C-S-H の生成や SiO₂ の沈殿などの様々な現象が平行して起こっているものと考えられるが、SiO₂ が沈殿するとしてケース 3 のほうが、ケース 2 よりも実験結果を精度よく表現できているものと考えられる。すなわち、Si を含む水和物の沈殿を考慮することが、解析精度の向上につながるものと考えられた。

5. 実構造物調査結果の検証解析

調査対象とした構造物は、供用後 70 年程度経過した東京都に存在する浄水場の擁壁コンクリートである²⁾。同コンクリートの推定 W/C は 65% であった。測定は地盤に接していた面を対象とし、EPMA による元素分析を行った。さらに、同試験結果を解析によって評価した。解析に用いる入力条件を表-4 に示す。解析はコンクリート単体のみを解析要素とし、環境温度は 15.6°C、解析領域は 50mm、1 次元で解析した。解析ケースは表-5 に示すように、境界条件を 2 ケース、SiO₂ 沈殿の有無で 2 ケースの計 4 ケースとした。境界条件としては、地盤中のイオン濃度で固定するパターン、および式(16)にしたがって境界のイオン濃度が上昇するパターンとした。設定した地下水の組成を表-6 に示す。また、式(16)における c の値は、構造物の 10 倍の長さを持つ地盤を想定して 0.01 とした。

EPMA から得られる構造物の Ca 濃度の実測値および解析結果を図-9 に示す。EPMA による分析結果をもっとも精度よく表現できているのは、境界濃度を地盤中のイオン組成で一定とし、SiO₂ が沈殿するとしてケース B である。地盤中に溶脱したイオンが蓄積する条件では、SiO₂

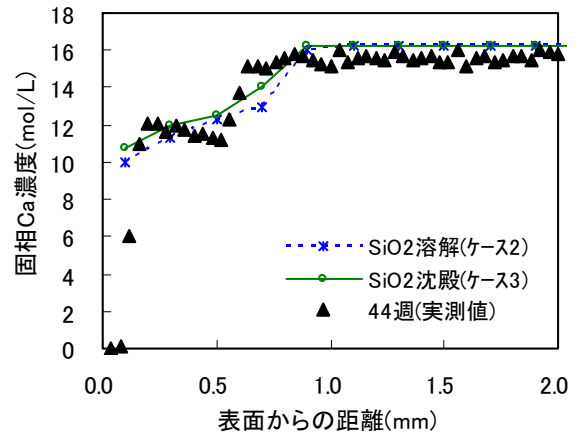


図-7 固相 Ca 濃度の解析結果および実測値 (W/C=40%, 44 週)

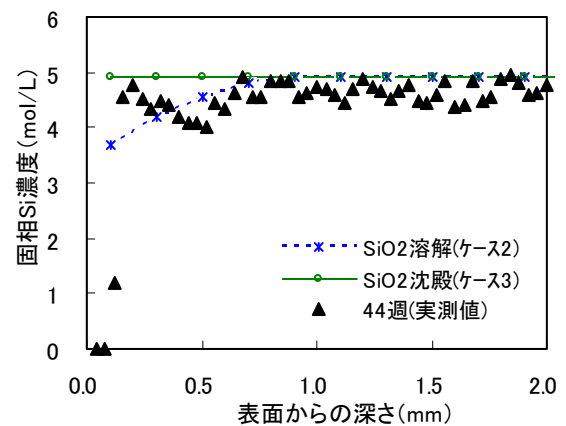


図-8 固相 Si 濃度の解析結果および実測値 (W/C=40%, 44 週)

表-4 実構造物調査結果の検証解析に用いる入力条件

境界条件	地下水
Ca(OH) ₂ の溶解度積 Ksp(mol/l) ²	4.4 × 10 ⁻⁵
C-S-H に関する係数 Acp1	0.81
C _{1ca} (mmol/l)	1.50
Cp _{2ca} (mol/l)	7.54

表-5 解析ケース

ケース	境界条件	SiO ₂ の沈殿
A	固定(地盤)	無(r=0)
B	固定(地盤)	有(r=1)
C	式(16)によって濃度増加	無(r=0)
D	式(16)によって濃度増加	有(r=1)

表-6 地盤中のイオン組成⁹⁾

環境	イオン濃度 (mmol/L)
地盤	Ca : 0.14, Si : 0.34, Na : 3.60, K : 0.062

の沈殿の有無に関わらず、変質が非常に遅くなる結果となった。調査したコンクリートは地下 5m 程度の場所に存在していたため、雨水の影響等で地盤中にイオンが蓄積される環境になかったものと考えられる。

次に、EPMA から得られる構造物の Si 濃度の実測値、

および図-9 から実測値に近い環境条件と考えられたケース A およびケース B における解析結果を図-10 に示す。境界濃度を地盤中のイオン濃度で固定し、 SiO_2 がすべて溶解するとしてケース A では、実測に比べて Si 変質深さが大きい結果となった。一方で実測値は、ばらつきはあるものの、Si の変質が Ca の変質に比べて小さい結果となった。これは、 SiO_2 の沈殿が生じたためと考えられる。以上のことから、今回の対象構造物における溶脱現象を適切に表現できるのは、境界条件を地盤中のイオン組成で一定とし、C-S-H の溶脱によって生じた SiO_2 が沈殿すると設定したケース B であると考えられる。

本解析手法を用いて、境界条件を適切に設定し、 SiO_2 の沈殿を考慮することで Ca の溶脱を精度よく予測できるものと考えられる。

6. まとめ

本論文では、筆者らがこれまで開発してきた溶脱解析手法の改良を目的として、W/C の異なるセメントペーストのイオン交換水への浸漬試験、および実構造物調査結果との比較解析を行い、改良した解析手法の妥当性について検討を行った。その結果、室内試験および実構造物の置かれた環境条件を適切に設定することで、セメント系材料からの成分溶脱を精度よく表現できることを明らかにした。また、C-S-H の溶脱に伴う SiO_2 の沈殿を考慮することで、実際の構造物における Ca の溶脱を解析によって精度よく表現できる可能性があることを示した。

参考文献

- 1) 庭瀬一仁, 廣永道彦, 辻幸和: 低レベル放射性廃棄物処分施設に用いるコンクリートの設計について, コンクリート工学, Vol.44, pp.3-8, 2006.2
- 2) 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, 東京工業大学学位論文, 2004
- 3) 横関康祐, 渡邊賢三, 古澤靖彦, 大門正機, 大即信明, 久田真: カルシウムイオンの溶出に伴うコンクリートの変質に関する実態調査と解析的評価, 土木学会論文集, No.697/V-54, pp.51-64, 2002.2
- 4) 芳賀和子, 廣永道彦, 田中知, 内川浩: 溶解過程における C_3S ペースト硬化体の反応と組成および構造の変化, セメント・コンクリート論文集, No.53, pp.36-43, 1999
- 5) 横関康祐, 渡邊賢三, 林大介, 坂田昇, 大即信明: 水和反応と温度依存性を考慮したセメント系材料のイオン拡散係数予測モデル, 土木学会論文集,

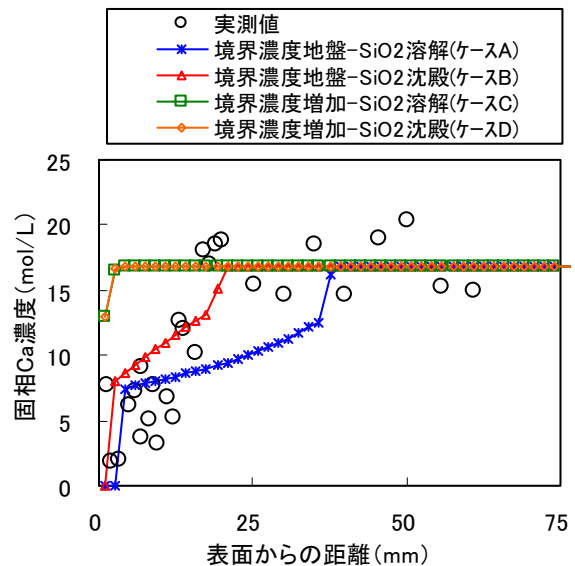


図-9 固相 Ca 濃度分布の解析結果と実測値

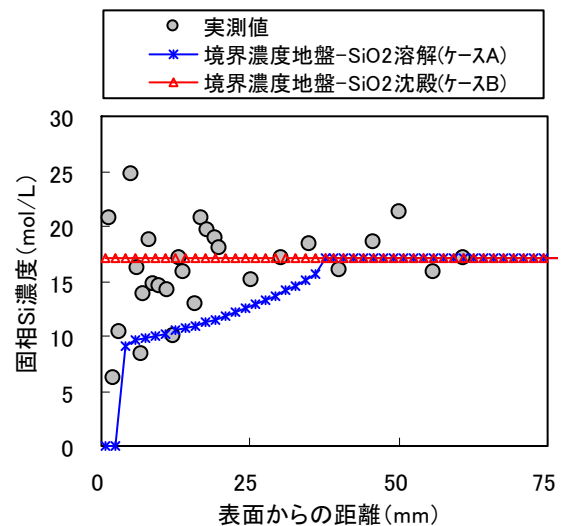


図-10 固相 Si 濃度分布の解析結果と実測値

No.725/V-58, pp131-142, 2003.2

- 6) 久田真, 大即信明, Diola, N.B., 桐山和晃: コンクリート中の電気泳動に及ぼす骨材の影響, 土木学会論文集, No.599/V-40, pp.71-80, 2002
- 7) Powers.T.C.: Physical Properties of Cement Paste, Proceedings of the Fourth International Conference on the Chemistry of Cement, U.S. National Bureau of Standards Monograph 43, Vol.2, pp.577-613, 1962
- 8) 須藤俊吉, 芳賀和子, 廣永道彦, 田中知, 長崎晋也: Ca の溶脱現象のモデル化と拡散係数の空隙量依存性, 土木学会論文集, No.753/V-62, pp.13-22, 2004
- 9) 核燃料サイクル開発機構: わが国における高レベル放射性廃棄物地層処分の技術的信頼性—地層処分研究開発第 2 次取りまとめ—総論レポート, JNC TN1400 99-020, 1999