

論文 混合酸のモル分率の影響を反応速度論に基づき考慮した化学的侵食によるセメント硬化体の質量減少率の推定方法に関する検討

宮本 慎太郎*1・榎本 悠*2・皆川 浩*3・久田 真*4

要旨: 混合酸がセメント硬化体に作用すると、混合している酸のモル分率に依存してセメント硬化体の質量減少率が変化することが確認されている。本論文では、混合酸の作用によるセメント硬化体の質量減少率のモル分率依存性を反応速度論に基づいて理論的に考察し、混合酸の作用によるセメント硬化体の質量減少率を推定する計算モデルについて検討した。その結果、混合酸の硫酸モル分率と可溶性のカルシウム塩の溶解速度の関係式を導出し、その関係式から反応生成物中のカルシウム塩の溶解比率を算出することで、二成分混合酸の作用によるセメント硬化体の質量減少率を精度良く推定できることを示した。

キーワード: 化学的侵食, 混合酸, 硫酸, 硝酸, 塩酸, モル分率, 反応生成物, 反応速度論

1. はじめに

セメント硬化体は強アルカリ性であり、酸が作用するとセメント硬化体表層部で中和反応が生じる。中和反応が生じると、セメント硬化体中の水酸化カルシウムやケイ酸カルシウムなどの水和物はカルシウム塩に変質する。一般的に、変質したカルシウム塩は水和物と比較して脆弱であるため、酸が作用したコンクリート構造物ではコンクリートの強度低下が懸念される。実際に、下水道施設では微生物が生成した硫酸の作用によってコンクリート製下水管が侵食を受け、道路の陥没を引き起こす事例が多数確認されている¹⁾。また、酸性河川に位置する橋梁では、橋脚下部のコンクリートが酸の作用によって侵食を受けている状況が写真-1のように観察される。

このような酸によるセメント硬化体の劣化現象は化学的侵食の一種に分類されており、現在までに国内外問わず数多くの研究が行われてきた²⁻⁴⁾。その結果、セメント硬化体の化学的侵食に関する諸現象や影響因子とその程度が明らかになってきている。しかしながら、現在までに成されてきた研究の多くは、ある酸が単独で作用した場合を対象としたものが多数を占めており、混合酸の作用によるセメント硬化体の劣化メカニズムを対象とした研究事例は非常に少ない⁵⁾。一方、酸性河川や温泉、化学工場といった実環境では、複数の酸



写真-1 酸性河川に位置する橋脚の劣化事例が同時に作用していることが多い⁵⁾。

以上の背景を踏まえ、著者らの研究グループでは混合酸の作用によるセメント硬化体の劣化メカニズムの整理を対象とした研究を行っており、混合酸が作用したセメント硬化体の質量減少率は酸のモル分率に依存して大きく変化することを実験により観察している⁶⁾。ここで、モル分率とは混合酸の混合比率を表す指標である。本論文では、この質量減少率のモル分率依存性を理論的に考察し、計算モデルにより再現することを目的とした。

2. 実験概要と諸条件

2.1 実験概要

(1) 使用材料

結合材は、普通ポルトランドセメント(密度 3.16g/cm³、

表-1 示方配合

供試体名	水セメント比 W/C (%)	砂セメント比 S/C	目標空気量 Air (%)	単位量 (kg/m ³)			
				水	セメント	細骨材	増粘剤
				W	C	S	
55P	55	0	5	607	1150	0	25
55M	55	2.5	5	290	550	1374	12

*1 東北大学大学院 工学研究科土木工学専攻, 日本学術振興会特別研究員 DC1 修(工) (正会員)

*2 東北大学大学院 工学研究科土木工学専攻 (正会員)

*3 東北大学大学院 工学研究科土木工学専攻准教授 博(工) (正会員)

*4 東北大学大学院 工学研究科土木工学専攻教授 博(工) (正会員)

比表面積 3320 cm²/g)を使用した。また、細骨材は、宮城県大和町鶴巣産の山砂(表乾密度 2.62 g/cm³, 吸水率 1.06%, 粗粒率 2.69)を使用した。

(2) 配合

本論文で用いたセメント硬化体の水セメント比(以下, W/C)は55%とした。また, 砂セメント比(以下, S/C)は0.0のセメントペーストとS/C=2.5のモルタルの2水準とした。なお, 材料分離抵抗性を統一する目的で, 練混ぜ直後のフロー値が220±20の範囲に収まるように増粘剤(主成分:アルキルアリルスルホン酸塩およびアルキルアンモニウム塩)を練混ぜ水と置換して添加した。置換率は練混ぜ水の質量に対して4%である。供試体の配合および記号を表-1に示す。

(3) 供試体の作製

本論文では, JISR5201 に準拠してモルタルおよびセメントペーストを練混ぜ, 寸法がφ50×100 mmのセメント硬化体を作製した。脱型は打設後約24時間で行い, 28日間の水中養生を施した。その後, モルタルカッターを用いてセメント硬化体を10 mm間隔で切断し, この切断したセメント硬化体を試験に使用する供試体とした。

(4) 使用した混合酸の諸条件

本論文では, 塩酸と硫酸の混合酸(以下, 溶液CS), と硝酸と硫酸の混合酸(以下, 溶液NS)の2種類を使用した。混合酸の水素イオン濃度は, [H⁺]=0.5 mol/L (pH=0.3)に調整した。水素イオン濃度の調整に関する計算条件は, 1価の強酸である塩酸と硝酸は完全に電離するとした。また, 2価の強酸である硫酸については, 硫酸から硫酸水素イオンへの電離は完全に生じ, 硫酸水素イオンから硫酸イオンへは電離定数 $K=1.02 \times 10^{-2}$ mol/Lで電離するとした。さらに, 混合酸中の各強酸の電離については, 各々の電離に関する平衡定数が非常に大きいことから, 各強酸の電離度は他の強酸の電離の影響を受けることはないと考え, 単独の強酸の電離条件をそのまま用いた。なお, 混合酸がセメント硬化体に作用したときのセメント硬化体の質量減少率のモル分率依存性を観察する目的で, 溶液CSと溶液NSに含まれる酸のモル分率は変化させている。また, 反応に伴う混合酸の水素イオン濃度の変化を極力小さくする目的で, 固液比を(固体の体積):(液体の体積)=1:150程度に調整した。

(5) 浸せき方法および質量の測定方法

図-1に浸せき方法の概要を示す。供試体の浸せき条件については浸せき中に反応生成物が剥落しないように静水中に静置し, 浸せき時間についても出来る限り浸せき中に反応生成物の剥落等が生じにくい条件として120分間の短時間とした。また, セメント硬化体の表面

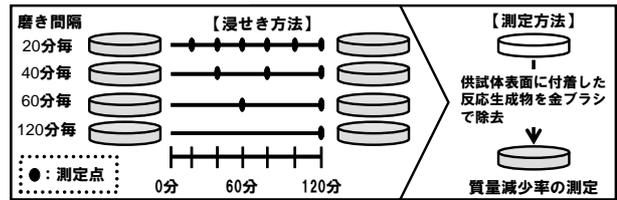


図-1 浸せき方法

に析出する反応生成物の皮膜の量がセメント硬化体の質量減少率に及ぼす影響を確認する目的で, 特定の時間毎に反応生成物をブラシで磨き落とした。なお, 本研究では磨き作業に酸の作用によって腐食しにくいステンレス製のものを使用した。そして, 特定の時間毎とは20, 40, 60分毎, そして浸せき期間中に一度も反応生成物の皮膜を磨き落とさない120分毎の4水準である。なお, 例えば20分毎に磨き作業を行ったものは@20minと呼称する。

浸せき終了後, セメント硬化体の劣化表面に析出した反応生成物の皮膜をステンレス製のブラシを用いて磨き落とし, 供試体表面に付着した水滴をウェスで除去した後に供試体の質量を0.01 gまで測定した。なお, 酸性溶液に浸せきせずにステンレス製ブラシで供試体に磨き作用を与えたとき, その質量減少率は磨き作用1回当たり0.02~0.03%であった。

2.2 測定項目と評価指標

(1) 質量減少率

供試体の質量減少率は, 混合酸に120分間浸せきした後の劣化した供試体の質量と浸せき前の供試体の質量を用いて, 式(1)で算出する。

$$R = \frac{W_0 - W_1}{W_0} \times 100 \quad (1)$$

ここに, R : 質量減少率(%), W_0 : 浸せき前の供試体の質量(g), W_1 : 混合酸に120分間浸せきした後の劣化した供試体の質量(g)。

(2) 質量減少率比

質量減少率比は混合酸の作用によるセメント硬化体の質量減少率が, 硫酸の単独作用によるセメント硬化体の質量減少率と比較してどの程度異なっているかを表す指標である。質量減少率比は, 式(1)で算出される質量減少率を用いて式(2)で算出する。

$$r_{Mixed\ acid} = \frac{R_{Mixed\ acid}}{R_{sulfuric\ acid}} \quad (2)$$

ここに, $r_{Mixed\ acid}$: 混合酸の作用によるセメント硬化体の質量減少率比, $R_{Mixed\ acid}$: 混合酸の作用によるセメント硬化体の質量減少率(%), $R_{sulfuric\ acid}$: 硫酸の単独作用によるセメント硬化体の質量減少率(%)。

例えば, $r_{Mixed\ acid} = 2.0$ であれば, 混合酸の作用によるセメント硬化体の質量減少率は, 硫酸が単独で作用したときと比較して2倍大きいことになる。

(3) 硫酸モル分率

混合酸の混合比率の定義は複数存在するが、本論文では、硫酸モル分率を用いて表現する。硫酸モル分率の算出法は次のとおりである。

例えば溶液CSにおいて、硫酸と塩酸のモル濃度が $C_{H_2SO_4}$ 、 C_{HCl} であったとき、硫酸モル分率は式(3)で算出できる。

$$x_{H_2SO_4} = \frac{C_{H_2SO_4}}{C_{H_2SO_4} + C_{HCl}} \quad (3)$$

ここに、 $x_{H_2SO_4}$ ：硫酸のモル分率、 $C_{H_2SO_4}$ ：硫酸のモル濃度(molL⁻¹)、 C_{HCl} ：塩酸のモル濃度(molL⁻¹)。

したがって、溶液CSの硫酸モル分率が0のときは、溶液CSは[H⁺]=0.5mol/Lの純粋な希塩酸であることを示しており、溶液CSの硫酸モル分率が1のときは、溶液CSは[H⁺]=0.5mol/Lの純粋な希硫酸であることを示す。

3. 実験結果とその観察

3.1 質量減少率

図-2に混合酸の硫酸モル分率と質量減少率の関係を示す。図-2より、同一の硫酸モル分率で比較すると、配合および混合酸の種類に関わらず、@20min > @40min > @60min > @120minの順に質量減少率が大きくなることを確認できる。ここで、@20minは浸せき試験中に劣化表面に析出した反応生成物を磨き落とす頻度が最も多い実験系であり、@120minは浸せき試験中に一度も反応生成物を磨き落とさない実験系である。したがって、セメント硬化体に作用する混合酸の硫酸モル分率が同じ場合、劣化表面に析出している反応生成物が多いほど、セメント硬化体の質量減少率の増加速度が抑制されることがわかる。

3.2 質量減少率比

図-3に混合酸の硫酸モル分率と質量減少率比の関係を示す。同一の硫酸モル分率で比較した場合、セメント硬化体の質量減少率は磨き間隔によって変化するが、質量減少率比は磨き間隔に依存せずほぼ同程度であることが図-3より確認できる。また、混合酸の硫酸モル分率がおおよそ0.4以上の範囲では、混合酸の作用によるセメント硬化体の質量減少率比は1程度であり、硫酸が単独で作用したときのそれと同程度であることが確認できる。一方で、硫酸モル分率がおおよそ0.4以下の範囲では、硫酸モル分率が小さくなるほどセメント硬化体の質量減少率比は増加する傾向が確認できる。

3.3 硫酸モル分率が質量減少に及ぼす影響

質量減少率または質量減少率比と硫酸モル濃度の関係は、次のようなメカニズムで生じると考えられる。まず、混合酸の硫酸モル分率が0.4~1.0の範囲では、劣化表面に硫酸カルシウムが優先的に生成されるため混合

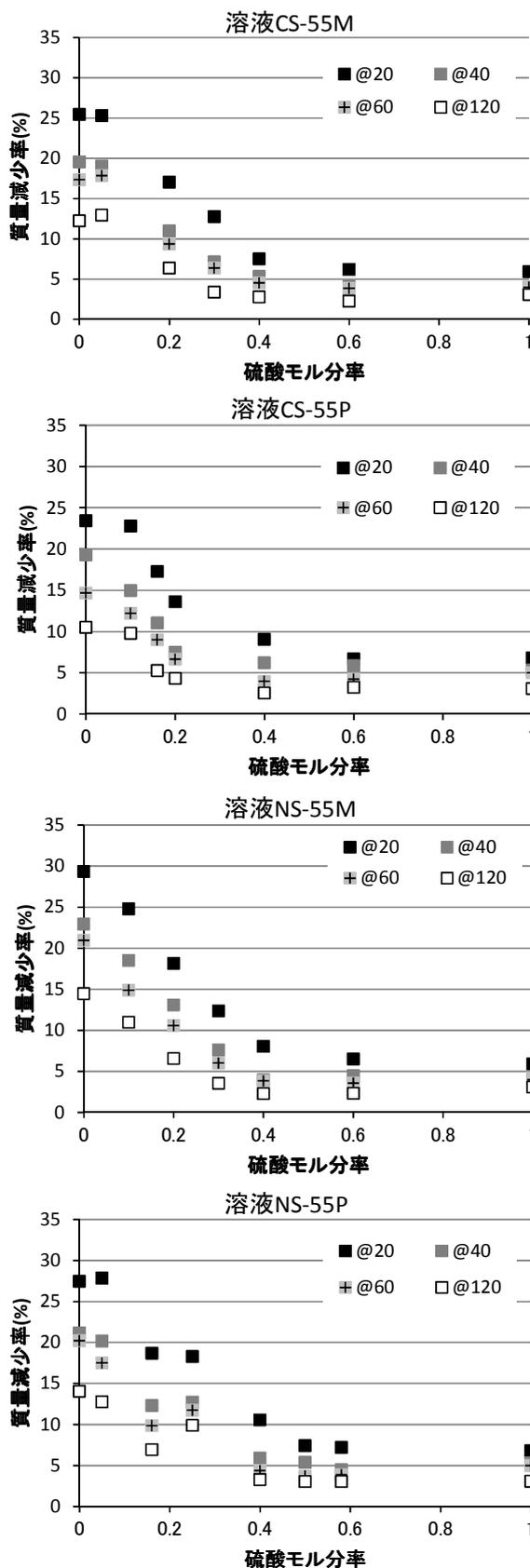


図-2 硫酸モル分率と質量減少率の関係

酸の作用によるセメント硬化体の質量減少率は、硫酸の単独作用によるセメント硬化体の質量減少率と同程度になる。一方で、混合酸の硫酸モル分率が0.0~0.4の

範囲では、可溶性の塩化カルシウム、硝酸カルシウムが生成され始めるため、混合酸の作用によって生じた反応生成物層が、硫酸カルシウムのみの層と比較して脆弱化する。そのため、混合酸の作用によるセメント硬化体の質量減少率が硫酸の単独作用によるセメント硬化体の質量減少率よりも大きくなったと考えられる⁶⁾。また、これらの現象は浸せき中の供試体の磨き間隔とは無関係に生じているので、混合酸の硫酸モル分率のみに依存していると考えられる。

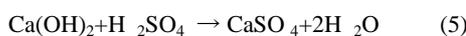
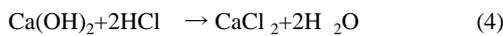
4 反応速度論に基づく質量減少率の推定

4.1 混合酸の作用による化学反応の整理

筆者らは既往の研究において、溶液CSまたは溶液NSがセメント硬化体に作用したときに自発的に進行する化学反応をGibbsの標準生成自由エネルギー変化量に基づいて検討した。その結果、現在までに知られている式(4)、式(5)、式(8)で示す中和反応と式(7)、式(10)で示すカルシウム塩の溶解の他に、式(6)と式(9)の2つの化学反応が自発的に生じることを数値的に推定した⁶⁾。

i) 溶液CSが作用したとき

第1段階



第2段階



ii) 溶液NSが作用したとき

第1段階



第2段階



第1段階は、セメント硬化体中の水酸化カルシウムと酸の反応を示している。また、第2段階は式(4)および式(8)の化学反応で生成された塩化カルシウムと硝酸カルシウムが硫酸と化学反応して硫酸カルシウムが生成される現象と硫酸との化学反応が行われずに塩化カルシウムと硝酸カルシウムの一部が水溶液中で溶解する現象を示している。

4.2 質量減少率比の推定方法に関する検討

(1) 質量減少率比と反応生成物の関係の整理

塩酸、硝酸、硫酸がセメント硬化体に作用したとき、式(4)と式(7)、式(8)と式(10)、式(5)の化学反応がそれぞれ生じる。したがって、塩酸と硝酸がセメント硬化体に作用したときには、硫酸がセメント硬化体に作用したときとは異なり、生成された可溶性のカルシウム塩

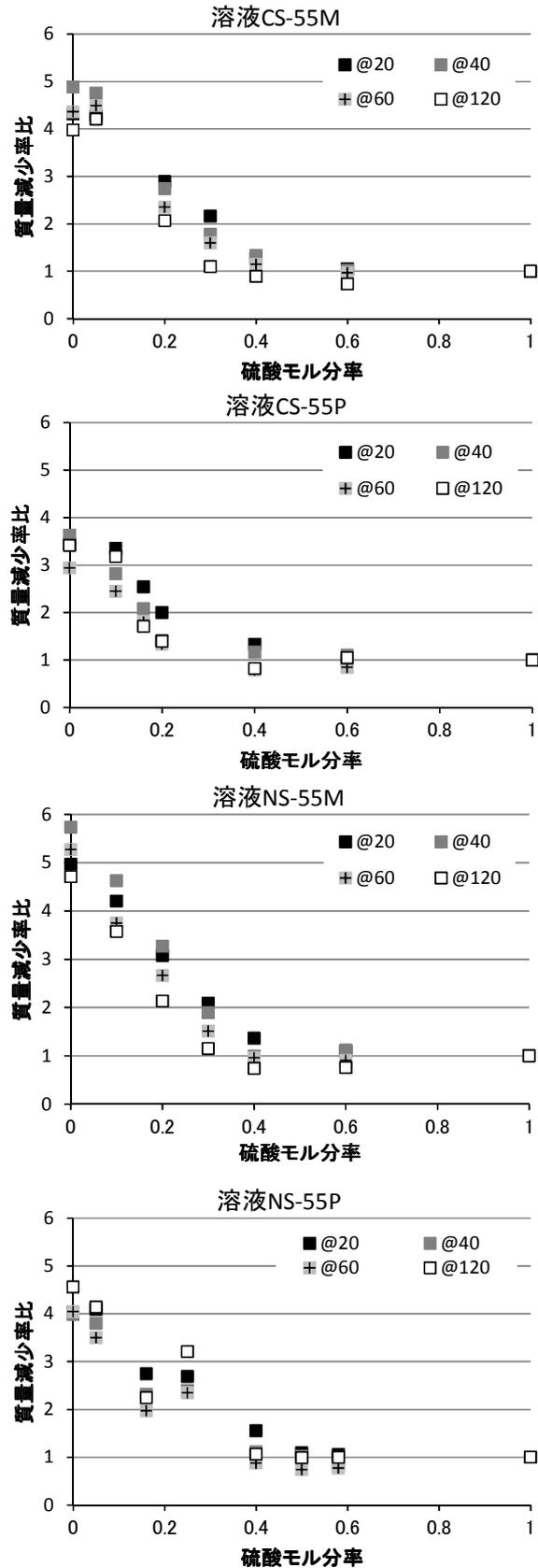


図-3 硫酸モル分率と質量減少率比の関係

が溶解するため、劣化表面に析出する反応生成物層が脆弱で表層部から脱離しやすくなる。そのため、塩酸や硝酸がセメント硬化体に作用したときの質量減少率

比は、硫酸が作用したときと比較して大きくなると考えられる。したがって、溶液CS、溶液NSがセメント硬化体に作用したときにも、生成される塩化カルシウムと硝酸カルシウムの溶解が生じることでセメント硬化体の質量減少率比が増加すると考えられる。そこで、本論文ではまず可溶性カルシウム塩の溶解速度について検討する。

(2) 反応速度に関する理論的な整理

反応速度を検討するにあたり、本論文では反応速度論を用いる。反応速度論は、分子同士の衝突と速度定数を用いて反応速度を算出する。例えば、式(11)の化学反応に関する反応速度式は、式(12)で示される。



$$\frac{1}{c} \frac{d[C]}{dt} = k[A]^{n_A} [B]^{n_B} \quad (12)$$

ここに、 k ：速度定数、 $[A]$ ：Aの活量、 $[B]$ ：Bの活量、 $[C]$ ：Cの活量、 n_A ：Aの反応次数、 n_B ：Bの反応次数。一般的に反応により消費される物質が希薄な溶液のときには、 $[A]$ 、 $[B]$ で示す活量はモル濃度(mol L^{-1})を用い、固体のときには1とする。また、反応で消費される物質が混合酸のような複数の物質が同時に作用するような物質のときには、 $[A]$ 、 $[B]$ で示す活量はその物質のモル分率を用いて計算する⁷⁾。

(3) 反応生成物の溶解速度に関する検討

初めに溶液CSについて検討する。前年度における実験結果および考察等に基づく⁶⁾、式(7)で示している塩化カルシウムの溶解が生じる条件は、式(4)で示した塩化カルシウムの生成速度が、式(6)で示した塩化カルシウムの消費速度よりも速いときである。したがって、それらの化学反応の反応速度について検討する。

式(12)を用いて、塩化カルシウムの生成速度と消費速度の式を整理すると、塩化カルシウムの生成速度は式(13)で、塩化カルシウムの消費速度は式(14)でそれぞれ表せる。

$$\frac{\partial[\text{CaCl}_2]}{\partial t} = k_{\text{CaCl}_2} [\text{Ca}(\text{OH})_2] [\text{HCl}]^2 \quad (13)$$

$$\frac{\partial[\text{CaSO}_4]}{\partial t} = k_{\text{CaSO}_4} [\text{CaCl}_2] [\text{H}_2\text{SO}_4] \quad (14)$$

ここに、 k_{CaCl_2} ：式(4)の塩化カルシウムの生成に関する速度定数、 k_{CaSO_4} ：式(6)の硫酸カルシウムの生成に関する速度定数、 $[\text{HCl}]$ ：溶液CSの塩酸モル分率、 $[\text{H}_2\text{SO}_4]$ ：溶液CSの硫酸モル分率、 $[\text{Ca}(\text{OH})_2]$ ：水酸化カルシウムの活量、 $[\text{CaCl}_2]$ ：塩化カルシウムのモル濃度(mol L^{-1})、 $[\text{CaSO}_4]$ ：硫酸カルシウムのモル濃度(mol L^{-1})。

ここで、固体である水酸化カルシウムと塩化カルシウムについては $[\text{Ca}(\text{OH})_2]=[\text{CaCl}_2]=1$ として式(14)に代入すると、塩化カルシウムの溶解速度は式(15)で表せる。

$$\frac{\partial[\text{Ca}^{2+}]}{\partial t} = k_{\text{CaCl}_2} [\text{HCl}]^2 - k_{\text{CaSO}_4} [\text{H}_2\text{SO}_4] \quad (15)$$

ここに、 $[\text{Ca}^{2+}]$ ：塩化カルシウムの溶解によって生じるカルシウムイオンのモル濃度(mol L^{-1})。

式(15)を解くとき、 k_{CaCl_2} と k_{CaSO_4} の2つの厳密な速度定数を定める必要がある。しかしながら、本論文で扱っている化学反応は固体と液体の反応であり、反応の進行は劣化表面に析出する反応生成物の量や種類に大きく依存する。そのため、厳密な速度定数を定めることは困難である。したがって、本論文では速度定数に関して以下の仮定を置く。

速度定数は、活性化エネルギーと衝突時の配向に依存する定数である⁷⁾。したがって、活性化エネルギーと配向の不一致についてそれぞれ仮定を置く。まず、活性化エネルギー不足に関して、式(13)と式(14)の反応はどちらも強酸と固体の反応なので、式(13)と式(14)の反応に関する活性化エネルギーは同程度と仮定する。また、衝突時の配向不一致に関して式(13)と式(14)で同程度の確率で生じると仮定する。

これらの仮定に基づくと、 $k_{\text{CaCl}_2} = k_{\text{CaSO}_4} = k$ と置ける。そして、式(15)にこの速度定数を代入すると、式(16)が得られる。なお、溶液CSの塩酸と硫酸のモル分率の関係については、式(17)で表すことができる。

$$\frac{\partial[\text{Ca}^{2+}]}{\partial t} = k [\text{HCl}]^2 - k [\text{H}_2\text{SO}_4] \quad (16)$$

$$[\text{HCl}] + [\text{H}_2\text{SO}_4] = 1 \quad (17)$$

以上の検討は、溶液NSの作用によるセメント硬化体に作用したときに関しても同様のことが言える。すなわち、溶液NSがセメント硬化体に作用したときに劣化表面に析出する硝酸カルシウムの溶解速度は式(18)で、溶液NSの硝酸とモル分率の関係は式(19)で表せる。

$$\frac{\partial[\text{Ca}^{2+}]}{\partial t} = k [\text{HNO}_3]^2 - k [\text{H}_2\text{SO}_4] \quad (18)$$

$$[\text{HNO}_3] + [\text{H}_2\text{SO}_4] = 1 \quad (19)$$

式(16)と式(17)を連立して塩化カルシウムが溶解し始める硫酸モル分率を、式(18)と式(19)を連立して硝酸カルシウムが溶解し始める硫酸モル分率をそれぞれ算出すると、どちらの解も $[\text{H}_2\text{SO}_4]=0.38$ になり、図-3で確認できる溶液CS、溶液NSの作用によるセメント硬化体の質量減少率比が増加を始める点を精度良く推定できている。この結果からも、混合酸がセメント硬化体に作用したとき、反応速度論に基づいて可溶性カルシウム塩の溶解速度を推定することが可能であると考えられる。

(4) 質量減少率比の推定式の導出

次に、式(16)において、溶液CSのモル分率が $[\text{HCl}]=1.0$ 、 $[\text{H}_2\text{SO}_4]=0.0$ のときが塩酸のセメント硬化体への単独作用による塩化カルシウムの溶解速度なので、

溶液 CS のセメント硬化体への作用による単位面積あたりの反応生成物の溶解比率は式(18)で表せる。

$$S_{CS} = \frac{k([\text{HCl}]^2 - [\text{H}_2\text{SO}_4])}{k \times 1.0^2} = [\text{HCl}]^2 - [\text{H}_2\text{SO}_4] \quad (20)$$

ここに S_{CS} : 溶液 CS のセメント硬化体への作用による単位面積あたりの反応生成物の溶解比率 ($0 \leq S_{CS} \leq 1.0$)。

ここで、劣化表面での反応生成物の溶解量に比例して、溶液 CS の作用によるセメント硬化体の質量減少率が塩酸の単独作用したときに近づくと考える。すると、溶液 CS の作用によるセメント硬化体の質量減少率は式(19)で表せる。

$$r_{CS} = r_{\text{HCl}} \cdot S_{CS} + r_{\text{H}_2\text{SO}_4} (1 - S_{CS}) \quad (21)$$

ここに、 r_{CS} : 溶液 CS の作用によるセメント硬化体の質量減少率比、 r_{HCl} : 塩酸の単独作用によるセメント硬化体の質量減少率比、 $r_{\text{H}_2\text{SO}_4}$: 硫酸の単独作用によるセメント硬化体の質量減少率比 (i.e. $r_{\text{H}_2\text{SO}_4} = 1.0$)。

以上の考察は、溶液 NS の作用によるセメント硬化体の質量減少率に関しても同様のことが言える。すなわち、溶液 NS のセメント硬化体への作用による単位面積あたりの反応生成物の溶解比率は式(22)で、溶液 NS の作用によるセメント硬化体の質量減少率は式(23)で、それぞれ表すことができる。

$$S_{NS} = \frac{k([\text{HNO}_3]^2 - [\text{H}_2\text{SO}_4])}{k \times 1.0^2} = [\text{HNO}_3]^2 - [\text{H}_2\text{SO}_4] \quad (22)$$

$$r_{NS} = r_{\text{HCl}} \cdot S_{NS} + r_{\text{H}_2\text{SO}_4} (1 - S_{NS}) \quad (23)$$

ここに、 S_{NS} : 溶液 NS のセメント硬化体への作用による単位面積あたりの反応生成物の溶解比率 ($0 \leq S_{NS} \leq 1.0$)、 r_{NS} : 溶液 NS の作用によるセメント硬化体の質量減少率比、 r_{HNO_3} : 硝酸の単独作用によるセメント硬化体の質量減少率比。

4.3 質量減少率比の推定方法の妥当性の検証

式(21)と式(23)を用いて、本論文で得られた溶液 CS、溶液 NS の作用によるセメント硬化体の質量減少率比の実測値 116 個の推定値を算出する。質量減少率比の推定値と実測値の比較を図-4に示す。また、式(21)と式(23)の精度を数値的に確認するため、実測値と推定値の決定係数を算出したところ $r^2 = 0.94$ が得られた。

図-4と決定係数の値より、式(19)と式(23)を用いることで、精度良く溶液 CS、溶液 NS の作用によるセメント硬化体の質量減少率を推定できることが確認できる。

5 まとめ

本論文では、著者らの研究グループが実験によって観察した混合酸の作用によるセメント硬化体の質量減少率のモル分率依存性を理論的に考察し、計算モデルを提案することを試みた。結果を以下に示す。

- 1) 塩酸と硫酸の混合酸 (溶液 CS)、硝酸と硫酸の混合

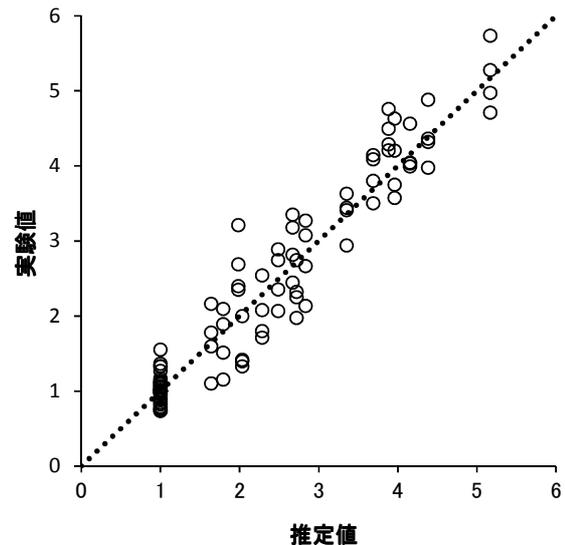


図-4 質量減少率比の推定値と実験値の比較

酸 (溶液 NS) の作用によるセメント硬化体の質量減少率および質量減少率比は、混合している酸のモル分率に大きく依存する。

- 2) 塩酸と硫酸の混合酸 (溶液 CS)、硝酸と硫酸の混合酸 (溶液 NS) がセメント硬化体に作用したとき、反応生成物の溶解速度は、混合している酸のモル分率を用いて推定することができる。
- 3) 塩酸と硫酸の混合酸 (溶液 CS)、硝酸と硫酸の混合酸 (溶液 NS) の作用によるセメント硬化体の質量減少率比は、推定した反応生成物の溶解速度を用いることで、精度良く算出することができる。

参考文献

- 1) 国土交通省都市・地域整備局下水道部：下水道長寿命化支援制度に関する手引き(案)平成 21 年度版, 2010.
- 2) 上田洋, 牛島栄, 出頭圭三：酸性水的作用を受けたコンクリートの特性および劣化予測, 土木学会論文集 E, Vol.63, No.1, 27-41, 2007
- 3) 蔵重勲, 魚本健人：硫酸侵食によるセメント硬化体の侵食メカニズム, セメント・コンクリート論文集, No.55, pp.458-464, 2001
- 4) 久田真, 寺林明日美, 皆川浩, 納口恭太郎：酸性環境下におけるセメント硬化体の劣化進行に関する研究, 土木学会論文集 E, Vol.64, No.3, 389-399, 2008
- 5) コンクリートの化学的侵食・溶脱に関する研究の現状, 土木学会, pp.34-48, 2003
- 6) 宮本慎太郎, 榎本悠, 皆川浩, 久田真：酸性水溶液の作用による反応生成物がセメント硬化体の劣化に及ぼす影響に関する考察, コンクリート工学年次論文集, Vol.32, No.1, pp.671-676, 2010
- 7) 柴田茂雄：物理化学の基礎, 共立出版株式会社, pp.222-241, 1999