

混合不均質性を考慮した CVOCs 汚染地盤への 鉄粉混合量の設計手法とその原位置検証[†]

伊藤 圭二郎* 川端 淳一** 嘉門 雅史***

Design Methodology of Granular Iron Content to CVOCs Contaminated Ground in Consideration of Mixture Heterogeneity and Field Application

by

Keihiro ITO^{*}, Junichi KAWABATA^{**} and Masashi KAMON^{***}

Remediation method using zero-valent granular iron is one of the most popular in-situ remediation technologies, and is designed to eliminate contaminant migration beyond the boundaries of the contaminated site by constructing a Permeable Reactive Barrier (PRB) using an iron sand mixture. In contrast, direct in-situ mixing of zero-valent iron with the actual contaminated soil using a higher mixing ratio has been proposed to effectively clean up in a short period of time. For this direct mixing method a proper design methodology should be devised. To propose this design methodology, we conducted a batch test, a column test, a three-dimension advection-dispersion-attenuation analysis, and a field test. The results were as follows. The design based on a batch test was confirmed that it coincided with a column test and the clean-up result in a field test. The safety factor of a granular iron mixture ratio was evaluated from the numerical analysis, in which the heterogeneity of granular iron mixture was taken into consideration. Example of evaluating the heterogeneity of granular iron mixture was shown in the field test.

Key words : Remediation method, Granular iron, Contaminated ground, Field application, Numerical analysis

1 緒 言

トリクロロエチレン (Trichloroethylene, 以下 TCE) などの揮発性有機塩素化合物 (Chlorinated Volatile Organic Compounds, 以下 CVOCs) は、溶剤や洗浄剤として金属製品製造業、化学工業などで大量に利用されてきたが、1990 年以降には、発がん性の疑い等から土壌および地下水に関する環境基準として指定された。現在では、土壌・地下水汚染の主要な物質となっており、その汚染の特徴は Fig. 1 のように地盤中に浸透した CVOCs 原液から長期間地下水への溶解が続き、地下水流れによって広域の地下水汚染を形成することにある。

こうした CVOCs 地盤汚染に対して、還元剤として作用する 0 価の鉄粉 (以下鉄粉) を地盤中に混合し、対象

とする汚染物質を無害な物質に還元分解する手法がある。この手法は、地盤中に透水性の反応壁 (Permeable Reactive Barrier, 以下 PRB) を設け、特に米国では自然地下水の下流側敷地境界に造成することで、10 年以上の長期間に亘る拡散防止対策とし既に多くの実績がある。¹⁾この場合の施工方法については、透水性の高い、つまり粒径の大きい砂と鉄粉を地上で混合し、汚染地下水の通過する地盤の一部をそれらで置換する工法が実施されている。鉄粉混合量の設計については、製品化されている浄化用鉄粉のうち費用対効果の高いものをバッチ分解試験で選定し、選定された鉄粉を用いたカラム分解試験により十分な浄化効果が得られ、かつ 10 年以上の長期にわたり汚染地下水を処理し続けることができるように鉄粉量を設計している。²⁾

一方で、日本では工場跡地の再開発に伴う浄化工事が比較的多く、1 年程度の短期間で浄化を行うニーズがある。このため、地下水下流側敷地境界だけでなく、汚染範囲全体に一定の割合で鉄粉を混合して、短期間で浄化を図る方式も活用され始めている。³⁾筆者らは、こうした場合の施工方法については、置換工法よりも単位体積あたりの施工コストが安価で、より広い範囲に鉄粉の混合が可能な混合かく拌工法が有効であると考え、その開発と適用を行ってきた。^{3), 4)}その場合の設計法としては、10

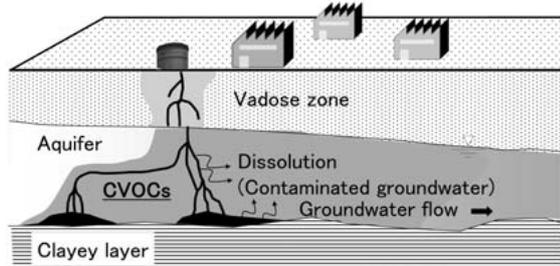


Fig. 1 Diagram of conceptual model CVOCs contaminated ground.

[†] 原稿受理 平成 20 年 4 月 18 日 Received Apr. 18, 2008 ©2008 The Society of Materials Science, Japan

* 鹿島建設技術研究所 〒182-0036 調布市飛田給, Tech. Res. Inst., KAJIMA Co., Ltd., Tobitakyu, Chofu, 182-0036

** 正会員 鹿島建設技術研究所 〒182-0036 調布市飛田給, Tech. Res. Inst., KAJIMA Co., Ltd., Tobitakyu, Chofu, 182-0036

*** 正会員 京都大学大学院地球環境学堂 〒606-8501 京都市左京区吉田本町, Graduate School of Global Environmental Studies, Kyoto Univ., Sakyo-ku, Kyoto, 606-8301

年以上の長期耐久性まで評価することを前提とした従来の2つの試験（バッチおよびカラム試験）を行う手法では、検討期間の長期化を招くため、より迅速な試験に基づく設計手法の確立が必要である。さらに、地盤中で鉄粉を混合するため、置換工法と比べると鉄粉の混合不均質性が高いことが予測され、不均質性が浄化効果へ与える影響についても考慮する必要がある。

以上の背景から本研究では、混合かく拌工法による鉄粉を用いた浄化技術を適用していくに際して、バッチ分解試験による設計手法の確立を図り、カラム分解試験や現場適用例との整合性を検討した。また、鉄粉の混合不均質性が浄化効果へ与える影響を3次元解析することで定量的な評価手法と設計への展開を示すとともに、さらに実汚染地盤での施工事例において鉄粉の混合不均質性を評価する手法を示した。

2 鉄粉混合量の既往の設計技術と課題

2.1 鉄粉反応経路

鉄粉により分解無害化可能な CVOCs については、主要な汚染物質であるテトラクロロエチレン (Tetrachloroethylene, 以下 PCE) やトリクロロエチレン (以下 TCE) などが確認されている。⁵⁾ その分解反応においては、Fig. 2 に示すとおり塩素基のうち一つが水素に置換されてシス-1,2-ジクロロエチレン (以下 cDCE) を経由する反応だけでなく、塩素が二つ同時に外れるβ脱離反応によってクロロアセチレンとなる反応経路がある。²⁾ また、鉄粉による PCE や TCE の分解反応ではβ脱離反応が卓越する傾向にあることも報告されている。⁶⁾

2.2 水溶液中での鉄粉分解反応速度

鉄粉による分解反応は一次反応で近似でき、初期濃度 C_0 [mg/L] の CVOCs 水溶液に一定量の鉄粉を混合すると、経過時間 t [d] での濃度 C [mg/L] は一定の反応速度定数 R_b [d⁻¹] によって式 (1) のように表現できる。また、反応速度定数 R_b は鉄粉混合量に比例するため、水溶液への鉄粉混合量当たりの反応速度定数 r_b [m³/kg・d] と鉄粉混合量 m_b [kg/m³] によって式 (1') のように表現することもできる。⁵⁾

$$C = C_0 e^{-R_b t} \quad (1)$$

$$C = C_0 e^{-r_b m_b t} \quad (1')$$

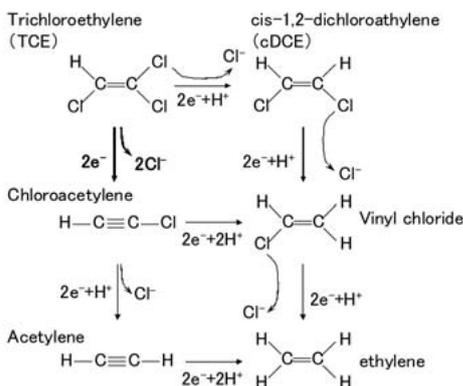


Fig. 2 Reductive β-elimination and hydrogenolysis reaction steps in degradation of TCE.

2.3 地盤中での鉄粉分解反応速度

地盤中での鉄粉と CVOCs 汚染地下水の接触時間 t は、鉄粉を混合した範囲を地下水が通過するのに要する時間である。これは、1次元の地下水流れを仮定すると、地下水動水勾配 i [-]、透水係数 k [m/d]、有効間隙率 n_e [-] から求められる地下水実流速 V [m/d] と、鉄粉を混合した地盤の地下水流れ方向の距離 L [m] により、式 (2) により求められる。

$$t = \frac{L}{V} = \frac{L}{ki/n_e} \quad (2)$$

$$C = C_0 e^{-R_c \frac{L}{ki/n_e}} \quad (3)$$

$$C = C_0 e^{-r_c m_c \frac{L}{ki/n_e}} \quad (3')$$

2.4 既往の鉄粉分解反応速度の設計

鉄粉混合量の設計では、反応速度定数を求めるための試験が必要である。一般的な手法として Fig. 3 に示すバッチ分解試験と Fig. 4 に示すカラム分解試験があり、それぞれの特徴を以下に述べる。

Fig. 3 に示すバッチ分解試験は、CVOCs 等の汚染濃度を調節した現場地下水に鉄粉を混合し、CVOCs 等の経時濃度変化から、式 (1) での R_b を評価するものである。評価された R_b をこの試験における水溶液への鉄粉混合量 m_b で除すことで r_b を求めることができる。

Fig. 4 に示すカラム分解試験は、円筒容器に鉄粉と土を混合したカラム媒体を所定の密度で作製し、そのカラ

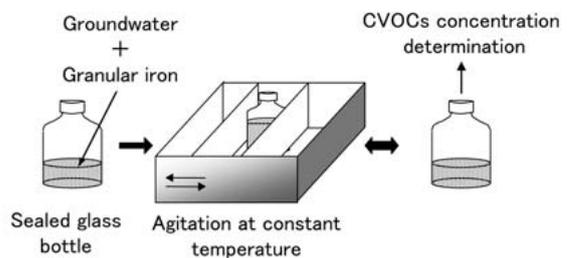


Fig. 3 Schematic of batch test method.

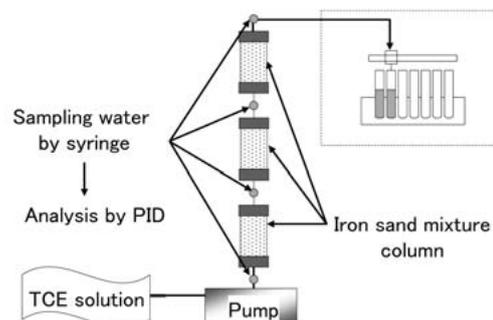


Fig. 4 Schematic of column test method.

ム媒体に対象化学物質の濃度を調整した地下水を通水させ、入口と出口の濃度分析結果から式 (3) での R_c を直接評価するものである。また、評価された R_c を円筒容器単位体積あたりに混合した鉄粉量 m_c で除すことで、 r_c を求めることができる。

長期供用を前提とした置換工法での設計においては、粒径、添加物や製造方法の異なる鉄粉について、バッチ分解試験によって性能の高い鉄粉のスクリーニングを行い、絞り込まれた鉄粉についてカラム分解試験を行って、現場地下水質での反応速度定数を求め、鉄粉混合量 m_c や PRB の厚さ L の設計を行ってきている。²⁾ PRB の鉄粉混合量 m_c や厚さ L の設計においてカラム分解試験が利用されているのは、直接地盤中の鉄粉混合量が求められる利点があるだけでなく、10 年以上といった長期的な浄化能力の持続性について評価するために、水質やイオン濃度の変化を把握する必要性がその理由となっている。

2.5 鉄粉混合量設計に関する課題

長期供用を前提とした場合には、カラム分解試験により反応速度定数が評価されるが、短期間での浄化対策の設計においては設計の迅速性も必要であり、そのためには多くの試験を並行して実施できるバッチ分解試験により設計できることが理想的である。しかしながら、直接的に地盤中への鉄粉混合量が求められないバッチ分解試験結果を実地盤での混合量決定に反映させるためには、バッチ分解試験を基にした設計手法の確立が課題である。また、置換工法では均質な鉄粉混合砂礫を地上で作成するため、鉄粉混合不均質性を直接的には想定していない。一方で、混合かく拌工法により鉄粉を地盤中に直接混合する場合には不均質性が高いものと推定され、浄化効果に及ぼす不均質性の影響を評価するとともに、施工しながら均質性を管理して必要に応じて再設計・再施工することも必要である。

3 バッチ分解試験による設計方法の検討

3.1 検討の概要

バッチ分解試験から地盤中への鉄粉混合量の設計を行うため、バッチ分解試験結果からの設計式を提案し、実際にその設計式による濃度低下直線とカラム分解試験の結果を比較することで妥当性の検討を以下で行った。

3.2 バッチ分解試験からの設計式

鉄粉を混合した地盤中では、地下水が接触している鉄粉量の平均は、間隙体積（通常飽和地盤なので間隙水量）と地盤に混合した鉄粉量の比率となる。このため、鉄粉と地下水の反応において、帯水層中の土粒子の化学的性質による鉄粉の CVOCs 分解反応速度の変化が無視できれば、鉄粉混合地盤中の間隙体積と鉄粉の比率により分解反応速度が決定されるといえる。このため、バッチ分解試験から地盤中での分解反応速度を表す式は、式 (1) において水溶液への鉄粉混合量 m_b を、鉄粉混合地盤間隙体積への鉄粉混合量に変換することで、式 (4) により計算可能である。また、地盤改良工法では工法によって改良径・幅が一定の場合がほとんどであり、一般に地盤単位体積当たりの鉄粉混合量 m_c が設計パラメータとな

り、間隙率 n [-] の鉄粉混合地盤では $m_c = m_b n$ であることおよび鉄粉の混合不均質性や施工方法によって必要となる鉄粉混合量の安全率 F を導入することで、式 (5) により設計可能となるものと考えられる。

$$C = C_0 e^{-r_b m_b \frac{L}{k_i/n_e}} \quad (4)$$

$$m_c = -F \times \frac{n k_i / n_e}{r_0 L} \ln \left(\frac{C}{C_0} \right) \quad (5)$$

3.3 バッチ分解試験方法と結果

バッチ分解試験は Fig. 3 に示す方法であり、ここでは内容積 27mL のバイアル瓶に、TCE 濃度 1mg/L に調整した蒸留水 10g と鉄粉 0.5g を 20°C で振とうさせ、気相部を窒素置換し、時間経過ごとに TCE 濃度をヘッドスペース-PID (Photo Ionization Detector) ガスクロマトグラフ法により分析した。鉄粉の種類は、実工事で使用できる十分な供給量もある Tabel 1 に主な性質を示す鑄鉄粉とアトマイズ鉄粉の二種類で実施した。

バッチ分解試験における TCE 濃度の経時変化および式 (1) に基づく回帰曲線を Fig. 5 に示す。試験での反応速度定数は、鑄鉄粉およびアトマイズ鉄粉それぞれ、 $R_b = 1.4, 0.52$ (d⁻¹) と求めることができ、蒸留水に対する鉄粉混合量 $m_b = 0.05$ (g/cm³) = 50 (kg/m³) から、式 (1) における反応速度定数 $r_b = 0.028, 0.01$ (m³/kg · d) を求めることができる。

3.4 カラム分解試験方法と結果

バッチ分解試験からの鉄粉混合量の設計の妥当性を確認するため実施した Fig. 4 に概要を示すカラム分解試験の条件を Table 2 に示す。鉄粉と豊浦砂を混合し、円柱ガラス容器 3 つにそれぞれ突き固めによって鉄粉混合砂カラムを作成し、それらを連結させて TCE 濃度を 1mg/L に調整した蒸留水を通水し、濃度が安定状態となった時点で試験を開始した。鉄粉混合量については、所定の流

Table 1 Type of granular iron used in the tests.

| Granular iron material | Particle size (μm) | Main chemical compositions (%) | | |
|------------------------|--------------------|--------------------------------|----------|---------|
| | | Fe | C | Si |
| Atomized | 70 | 95> | 0.08~.18 | 0.03< |
| Cast | 60 | 88~93 | 2.5~4.0 | 1.5~3.0 |

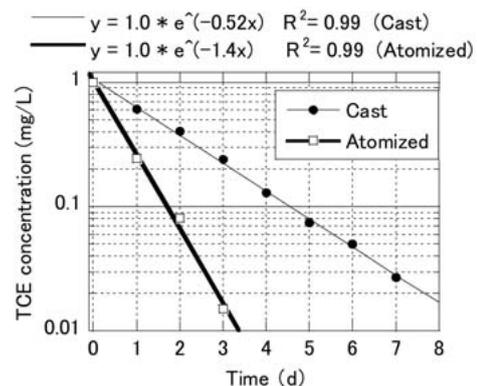


Fig. 5 TCE concentration vs. time for batch test.

Table 2 Column test condition.

| Type of sand | Toyoura sand |
|---|--------------|
| Particle density (g/cm ³) | 2.64 |
| Iron mixing content, m_b (kg/m ³) | 195 |
| Temperature (°C) | 20 |
| Column height (cm) | 10 × 3 |
| Column diameter (cm) | 3.2 |
| Dry density (g/cm ³) | 1.68 |
| Porosity (—) | 0.36 |
| Darcy's velocity (cm/d) | 14 |

速で、3つの鉄粉混合砂カラムを通過することで、1/10程度の濃度低下が観測できるように、間隙体積への鉄粉混合量 $m_b = 195$ (kg/m³)とした。流速については、ポンプで流量制御することでダルシー流速 14cm/d、実流速については砂の場合有効間隙率が間隙率に近い値である⁷⁾ことから 0.36 と仮定して計算すると 39cm/d である。分析は、間隙体積が入れ替わるごとにマイクロシリンジで 100μL 採水し、1.5mL のバイアル瓶でヘッドスペース-PID ガスクロマトグラフ法により分析した。

カラム分解試験でのカラム浸透距離と TCE 濃度の関係、およびバッチ分解試験での反応速度定数から式 (4)により計算した直線を同時に Fig. 6 に示す。カラム分解試験のプロットは、浸透距離 20 ~ 30cm のカラムにおいて計算値よりも大きく濃度が低下する傾向はあるが、計算値は初期の濃度低下はよく一致している結果となっている。20 ~ 30cm で大きな濃度低下する傾向についても安全側の評価となることから、設計上は問題ない結果と考えられる。

以上より、豊浦砂では式 (4)および(5)の前提条件である砂が鉄粉の CVOCs 分解反応速度の変化に与える影響が小さいため、バッチ分解試験から計算した値とよく一致したものと考えられる。この結果から、少なくとも豊浦砂では式 (5)による設計は妥当であり、豊浦砂と同様に鉄粉の反応性に影響のない砂であれば、式 (5)により設計することも十分に精度があるといえる。

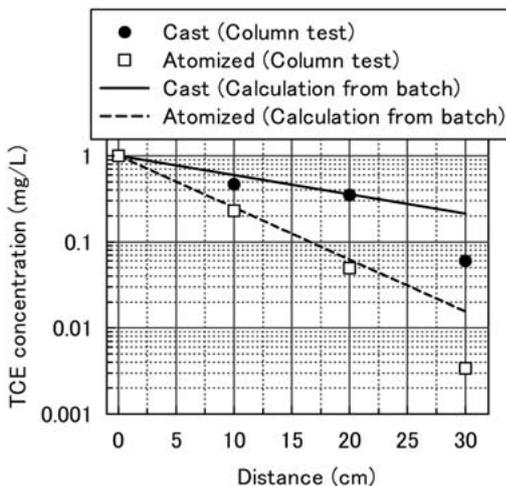


Fig. 6 TCE concentration vs. distance for column test with calculated line based on batch test result.

4 鉄粉混合不均質性の浄化効果への影響解析検討

4.1 検討方法

鉄粉混合の不均質性に関する解析は、3次元移流分散減衰解析により、鉄粉混合地盤に汚染地下水が水平方向に流入した場合の浄化効果を求めることによって行い、要素ごとに反応速度定数をランダムに与えることで、不均質性を表現した。移流分散減衰解析の基礎式は式 (6) および式 (7)であり、実流速に基づく移流項 (式 (6)右辺第2項)、実流速のばらつきと分子拡散に基づく分散項 (右辺第1項)、鉄粉のような物質の分解が生じる場合の減衰項 (右辺第3項)を考慮したものである。なお、ここで使用した解析コードは Dtransu-3D・EL⁸⁾である。

$$R\theta\rho \frac{\partial C}{\partial t} = \frac{\partial}{\partial x_i} \left(\theta\rho D_{ij} \frac{\partial C}{\partial x_j} \right) - \theta\rho V_i \frac{\partial C}{\partial x_i} - R\theta\rho\lambda C \quad (6)$$

$R[-]$: 遅延係数, $\theta[-]$: 含水率, $\rho[t/m^3]$: 流体密度,

$C[mg/L]$: 濃度, $D_{ij}[m^2/d]$: 分散テンソル

$V_i[m/d]$: 実流速, $\lambda[d^{-1}]$: 減衰定数

$$D_{ij} = \alpha_T \|V\| \delta_{ij} + (\alpha_L - \alpha_T) \frac{V_i V_j}{\|V\|} + \alpha_m \tau \delta_{ij} \quad (7)$$

$\alpha_L[m]$: 縦分散長, $\alpha_T[m]$: 横分散長

$\|V\|[m/d]$: 実流速の絶対値,

$\delta_{ij}[-]$: クロネッカーのデルタ

$\alpha_m[m^2/d]$: 分子拡散係数, $\tau[-]$: 屈曲率

4.2 解析条件

解析条件を Table 3 に示す。解析サイズは鉄粉混合地盤の一部を取り出し、100cm × 50cm × 50cm とした。ここで、式 (5)における地下水流れ方向 L にあたる X 方向の距離については、想定している混合かく拌工法の改良径に依存するが、施工方法によって 1m 弱~最大 5m 程度まで想定され、ここでは解析例として 1m を仮定した。解析での地下水流れ方向 L は、後述する解析結果のとおり小さく設定するほど鉄粉混合量の安全率としては大きくなるため、 $L = 1$ (m) という条件は、 $L = 1$ (m) 以上の場合に対して安全側で評価していることとなる。解析メッシュサイズは、実際に鉄粉混合地盤を作成した後に評価

Table 3 Analytical condition.

| Input parameter | Input Value | |
|---|----------------------------------|----------------------|
| Analysis domain (cm) | 100 × 50 × 50 | |
| Mesh size (cm) | 5 (Case1), 2 (Case2) | |
| Longitudinal dispersivity, α_L (cm) | 1 | |
| Transverse dispersivity, α_T (cm) | 0.1 | |
| Groundwater velocity, V_x (cm/d) | 9.5 | |
| Groundwater concentration flowing into granular iron mixture zone, $C(X=0)$ | 1 | |
| Reaction rate coefficient heterogeneity | Average value (d ⁻¹) | 0.23 |
| | Variation coefficient (%) | 25, 50, 75, 100, 200 |

する試験サイズと合わせる必要があり, 現実的に $\Phi 5\text{cm}$ 程度以下の安価なボーリングにより土壌が採取されて評価試験が行われることが合理的である. このため, 最大のサイズとして 5cm 立方 (Case1), それより小さい評価サイズとして, より少ないサンプル量で試験できる 2cm 立方 (Case2) でも実施した. Case1 の 5cm 立方は, 砂質土の湿潤密度を $1.8\text{g}/\text{cm}^3$ と仮定すると鉄粉混合土壌サンプル 200g 程度, Case2 の 2cm 立方ではサンプル 10g 程度で評価されることを想定している. 解析での反応速度定数に同じ変動係数を与える場合には, 解析メッシュサイズを大きくするほど浄化効果への影響は大きくなるため, 実際の土壌サンプルの評価サイズよりも大きいメッシュサイズでの解析結果を参照にすることで, 安全側に評価することができる.

地下水実流速は, 透水係数 $1 \times 10^{-2}\text{cm}/\text{s}$ で動水勾配 $1/300$ 程度の地盤を想定し, 鉄粉を地盤中に $100\text{kg}/\text{m}^3$ 程度混合しても透水性は変化しないとの室内試験および施工例⁴⁾より, 鉄粉混合地盤内でも同等と仮定した. 地下水汚染濃度は, 上流側より濃度 $1\text{mg}/\text{L}$ の汚染地下水が流入し続けることを想定した. 移流の卓越する本解析の場合に影響のある分散長については, 大きく設定するほど対象汚染物質の濃度が分散して不均質に混合された鉄粉と接触し易くなるため浄化に有利に影響するが, 安全側で評価するため既往の文献⁹⁾を参考に小さい値で設定した.

鉄粉の混合不均質性に基づく反応速度のランダムな分布については, 鉄粉の混合不均質性が正規分布であると仮定し, 反応速度定数の平均値と分散を平均値で除した変動係数を所定の値に設定することにより与えた. 変動係数, すなわち鉄粉混合不均質性の度合いによる浄化効果の検討は, 変動係数を変化させて解析した各ケースにおける鉄粉混合地盤下流側の地下水濃度の違いにより評価した. 一例として, Case2 で変動係数 50% と仮定した場合の Y-Z 断面での反応速度定数分布を Fig. 7 に示す. 乱数を発生させて解析要素ごとに平均値および所定の変動係数となるような反応速度定数を設定した. 変動係数は, 25, 50, 75, 100, 200% の 5 ケース実施することで, 不均質性の浄化効果への影響について評価した.

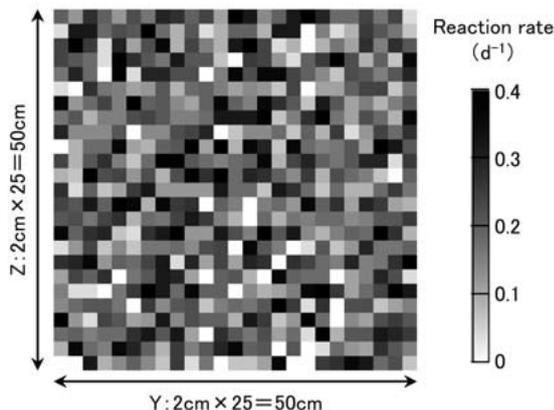


Fig. 7 Distribution of reaction rate on Y-Z plane view in Case2.

4・3 解析結果

解析結果の一例として Case2 での変動係数 50% のケースでの濃度分布を Fig. 8 に示す. 地下水濃度が, 極端に浄化されずに下流側まで流れる傾向はみられない結果であり, 反応速度の不均質性があっても地下水が動くことで, 濃度が均質化される傾向にある.

こうした傾向をより定量的に評価するため, 地下水流れ (X 軸) 方向での最大・最小の節点濃度範囲を縦線で, 平均節点濃度をプロットで示したものを Fig. 9 に示す. $X = 30\text{ (cm)}$ 程度以降で最大・最小濃度の幅は, ばらつきはあるがほぼ一定の幅で濃度が低下する傾向である. 縦線で示した濃度範囲は, 完全に均質に混ざった場合を想定した濃度低下直線よりは高い濃度となるが, その 83% の勾配の濃度低下直線よりは全ての節点で低い濃度となることが分かる. このため, 鉄粉混合量を 83% の逆数である 1.2 倍で設計すれば, 目標とする濃度低下直線以下に収まるといえる. また, 前述のとおり最大・最小濃度の幅はほぼ一定となることから, 厚みによって不均質性に依存する鉄粉混合量の安全率は低下する傾向にあることもいえる.

Fig. 8 および Fig. 9 は Case2 で変動係数 50% での結果を整理した内容を示したが, Case1 および Case2 の全ての解析結果について同様の整理を行ったものを Fig. 10 にまとめる. Case1, Case2 のどちらのメッシュサイズで評価した場合も同様に, $X = 1\text{ (m)}$ 地点での最大節点濃度は変動係数と共に増加する傾向であり, 変動係数 50% 以下

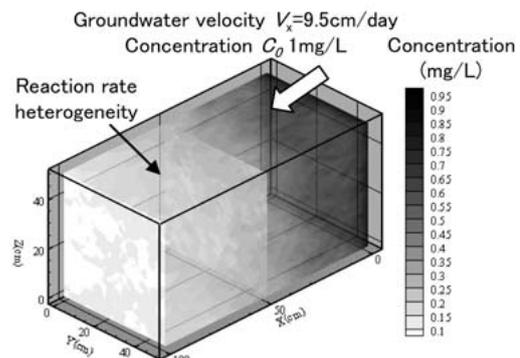


Fig. 8 Distribution of concentration for variation coefficient 50% of Case2.

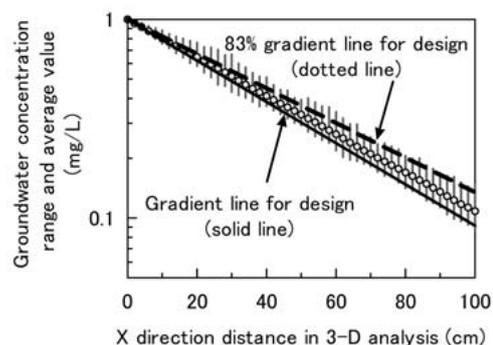


Fig. 9 Relation between groundwater concentration with X direction distance in Case2.

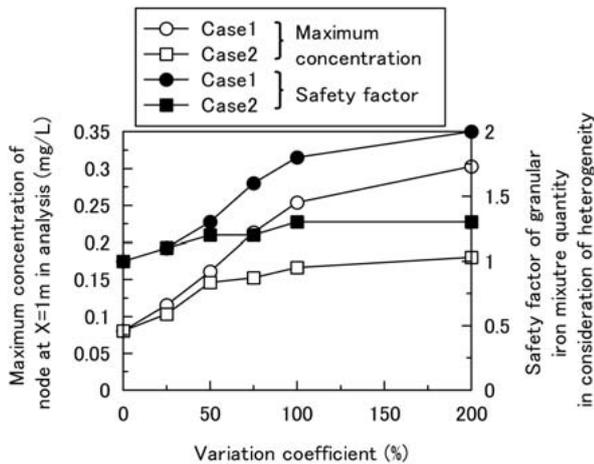


Fig. 10 Relation between variation coefficient and maximum concentration at $X = 1$ (m) and safety factor to be considered.

では両者は近い値となっているが、それ以上は Case1 が大きくなっている。また、Case1 でも 100% までは変動係数に対して線形的に増加するが、200% では若干勾配が小さくなる傾向にある。右軸に示した不均質性を考慮した鉄粉混合量の安全率についても同様に、Case2 では変動係数 200% でも 1.3 であるのに対して、Case1 では変動係数 75% から 1.6 となり、Case2 とはく離しており、200% では安全率 2 まで増加する結果となっている。

以上のように、鉄粉の混合不均質性に起因する反応速度のばらつきの浄化効果への影響は、解析要素ごとに反応速度をランダムに与えた 3 次元移流分散減衰解析により、定量的に評価可能であり、鉄粉混合量の安全率を考慮することで設計へ反映していくことも可能であるといえる。また、こうした不均質性の影響を定量的に評価することで、浄化不具合が生じた場合についても、不均質性の影響は明確となるため、要因を絞り込むことにもつながると考えられる。

5 現場実験による検証

5.1 現場実験の目的と地盤状況

現場実験は、バッチ分解試験による設計による浄化効果の検討と鉄粉の混合不均質性の評価方法を検討するため実施した。

実施した敷地は、PCE に汚染された工場跡地であり、汚染源と推定される範囲から地下水流れによって 100m 程度下流側の地下水汚染範囲で実施した。この範囲では、土壌溶出試験で環境基準値を超過する地点はなく、地下水のみが 0.1mg/L 程度検出されている。当地盤の土層構成および地下水位は Fig. 11 に示すとおり、概ね G.L.-7 ~ -10m の帯水層（砂層）があり、G.L.-7m までには一部にシルト層の介在する砂層、G.L.-10m からは連続的な粘土層が存在する。揚水試験結果から帯水層の透水係数が $5.0 \times 10^{-2} \text{cm/s}$ であることが分かっている。

5.2 現場実験での施工方法と施工配置

現場実験での施工方法を Fig. 11 に示す。地盤改良で実施されてきた噴射かく拌工法であり、噴射管を地盤中

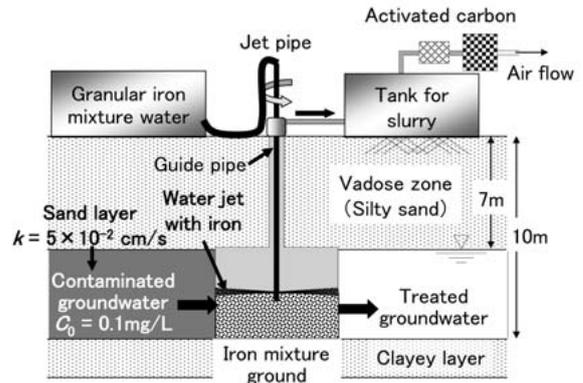


Fig. 11 Construction method to make iron mixture ground and soil layer and ground water table.

に挿入し、鉄粉の濃度を 200kg/m^3 に調節した鉄粉水を 30 MPa の圧力で施工深度下端より噴射し、回転させながら噴射管を所定深度まで引き上げることで鉄粉混合地盤を造成する。地盤単位体積あたり改良径は、過去の地盤改良での実績から当地盤の N 値 (=50) であれば、改良径が 3.0m 程度確保できることを想定して実施した。

現場での施工配置を Fig. 12 に示す。現場実験は地盤汚染のある工場建物内部で実施したため、施工制約から必ずしも合理的な配置ではないものの、以下のとおり評価を行った。また、井戸 P で揚水することで、一定地下水流向・流速で実験を行えたものと考えている。

- No. 3 の鉄粉混合体では、上流側に流入濃度を確認する井戸 M1 があり、下流側に M3 があるため、鉄粉混合体による浄化効果を評価した。
- No. 1 ~ 4 全てで、施工後の鉄粉混合体内のボーリング (B1 ~ B6) により鉄粉混合土壌サンプルを採取し、PCE を添加することで、反応速度定数の変動係数の評価を行った。
- No. 1 と No. 2 については、施工技術上の課題から、ラップさせた場合の混合性能を評価するために実施した。

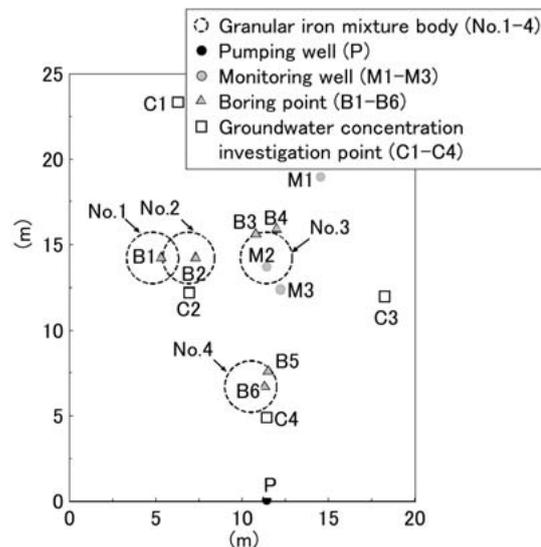


Fig. 12 Plane arrangement of experiment on contaminated site.

5.3 鉄粉混合量の設計

5.3.1 設計条件 鉄粉混合量の設計は、バッチ分解試験結果から求める式 (5) により行った。設計条件を以下に示す。

- 鉄粉を混合した地盤の透水性は、本工法での過去の実績から原地盤と同等であり、⁴⁾1 次元流れに単純化できる。
- 初期地下水濃度 C_0 : 周辺での地下水濃度分析結果から、地下水中の PCE 濃度は 0.1mg/L とした。
- 浄化効果を評価する鉄粉混合体 No.3 内での地下水実流速は、周辺井戸での水位測定から動水勾配 $i = 1/700$ 、透水係数 5.0×10^{-2} cm/s、有効間隙率は既往の研究⁷⁾から砂であれば 0.3 と仮定し、20cm/d とした。
- 混合径は通常の砂地盤であれば経験的に 3.0m であるため、Fig. 13 のように 2.1m 四方の鉄粉混合体が確保でき、少なくとも長さ $L = 2.1$ (m) が確保できるとした。

5.3.2 バッチ分解試験結果 設計のため実施したバッチ分解試験結果を Fig. 14 に示す。現場実験では Table 1 に示した鉄粉とアトマイズ鉄粉を 3:1 に混合した鉄粉を使用し、鉄粉 0.6g と PCE 濃度 1mg/L に調整した現場地下水 10g を混合してバッチ分解試験を行った。PCE 濃度はほぼ指数関数に近似され、反応速度定数 R_b は 0.27d^{-1} 、 r_b は $4.5 \times 10^{-3}\text{m}^3/\text{kg} \cdot \text{d}$ である。PCE 濃度の 2 割程度の TCE および cDCE が生成するが、それらも分解される傾向にあり、PCE 濃度を超えることはない。このため、初期値として最も高く、かつ環境基準値が 0.01mg/L と最も低い PCE を低下させるために鉄粉混合量を設計する必要がある。

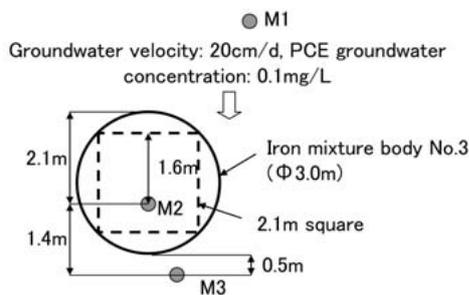


Fig. 13 Designe condition for remediation on the site.

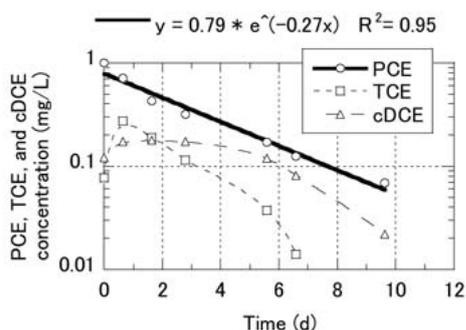


Fig. 14 PCE, TCE, and cDCE concentration vs. time for batch test.

5.3.3 鉄粉混合量の安全率と設計 鉄粉混合量の安全率については、鉄粉混合量の不均質性については 2cm 立方で評価して変動係数 100% 以下に収まると仮定して 1.3 とした。次に、噴射かく拌工法では注入した材料の一部が地上へ排出されることに基づく鉄粉混合量の安全率は、鉄粉水の総注入量が、改良体の直径 3.0m であることを想定すると、地盤に対して約 25% 程度であり、全体積は原地盤の 1.25 倍となり、全て均一に混合されたと仮定して注入した鉄粉のうち 20% は排出される。ただし、これについては、均一になることが不確定な要素が強く、ここでは噴射した鉄粉のうち 50% が排出されることまで許容できるように鉄粉混合量の安全率としては 2、さらに配管等に残留する鉄粉等の施工ロスによる安全率 1.05 を設定し、トータルで鉄粉混合量の安全率を $2.73 \approx 2.8$ とした。以上より、式 (5) における設計鉄粉混合量は、間隙率 n を 0.4 と仮定し、地盤 1m^3 あたり 55kg の鉄粉を噴射することとした。

5.4 施工結果

5.4.1 鉄粉混合の均質性評価 鉄粉混合均質性については、B1 ~ 6 でのボーリングサンプルに PCE を添加して反応速度を確認することで評価した。B1 ~ 6 でのボーリングサンプルのうち、施工範囲である GL-8m と GL-9m の鉄粉混合地盤サンプル 10g に、PCE 濃度を 1mg/L に調整した蒸留水 10mL を混合したバッチ分解試験を行い、分解能力を確認した。その結果を Fig. 15 に示す。中心から 1.7m 離れた B4 を除く、混合半径として想定した中心から 1.5m までの範囲では顕著な濃度低下があり、ラップさせた No. 1 と No. 2 内の B1 および B2 についても単独の混合体とほとんど変化のない結果となっている。試験結果の指数関数回帰曲線における反応速度定数 R_b は $0.18 \sim 0.64\text{d}^{-1}$ の範囲であり、変動係数にすると 30% 程度に収まっている。この試験は、ボーリングサンプル 10g に対して実施していることから、サンプルの湿潤密度を一般的な砂である $1.6 \sim 2.0\text{g}/\text{cm}^3$ 程度とすると、2cm 立方未満での鉄粉混合量の不均質性を評価していることとなる。2cm 立方の評価サイズで 30% の変動係数の場合、第 4 章の Fig. 10 に示した解析結果からは安全率 1.2 で鉄粉混合量を決定すればよかったことになり、

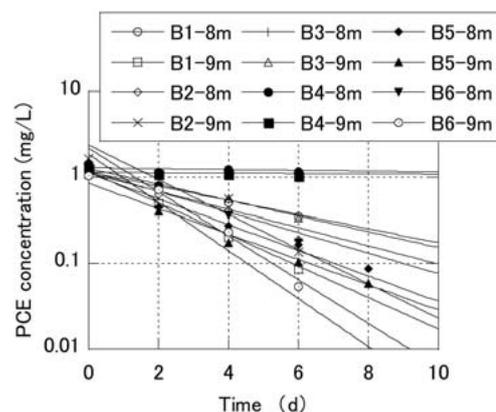


Fig. 15 Batch test result to evaluate iron mixture rate heterogeneity in applied depth.

実際にこの現場では設計時に安全率 1.3 を考慮していたことから、鉄粉の混合不均質性の影響は浄化効果にないものと判断できる。

5・4・2 浄化効果 No. 3 での浄化効果を評価するため実施した混合体 3m 程度上流側 M1, 混合体内 M2, 混合体 50cm 下流側 M3 のそれぞれの観測井戸での地下水濃度分析結果を Fig. 16 に示す。上流側である M1 では 0.1mg/L 程度の汚染が検出されているにも関わらず、混合体内と混合体下流側は施工後には鉄粉混合地盤の地下水が流れることによって環境基準値以下に低下し、その後も持続的に基準値以下の結果となっている。また、環境基準値より大幅に低下していることについては、鉄粉混合量の安全率について安全側で設定していることが主に影響しているものと考えられる。この結果から、鉄粉混合量が多い可能性はあるが、少なくとも環境基準値以下まで浄化するという目的に対して、バッチ分解試験に基づいた鉄粉混合量の設計も十分な精度があることが示された。

6 結 論

短期間での浄化を目標とする場合に有効な地盤改良工法を用いた CVOCs 汚染地盤への鉄粉の混合について、室内試験、数値解析、現場試験を行って設計に関する課題に取り組んだ。以下に本研究により得られた結果をまとめる。

迅速な設計手法としてバッチ分解試験に基づいた設計式は、カラム分解試験および現場実験との比較により、十分に鉄粉混合量を設計する試験手法としての精度があることを確認した。

鉄粉混合不均質性による地下水浄化効果への影響については、3次元移流分散減衰解析を利用した評価手法を提案した。提案した解析評価手法により、不均質性の程度に応じた浄化効果への影響を定量的に評価できること

を示すと同時に、鉄粉混合量の安全率を考慮すれば、設計通りの浄化効果が得られることを示した。

現場実験においては、バッチ分解試験によって設計した鉄粉量を地盤中に混合し、想定範囲内の均質性で施工できれば、目標とする浄化効果が得られることを示すと同時に、鉄粉の混合不均質性を評価する手法も示した。

本論文の作成にあたり、京都大学大学院地球環境学堂 勝見准教授に、さまざまご助言とご助力をいただいた。ここに深く感謝の意を表す。

参 考 文 献

- 1) U. S. EPA, "Field Applications of In Situ Remediation Technologies : Permeable Reactive Barriers", EPA 542-R-99-002 (1999).
- 2) U. S. EPA, "An In Situ Permeable Reactive Barrier for the Treatment of Hexavalent Chromium and Trichloroethylene in Ground Water : Volume 1 Design and Installation", EPA/600/R-99/095a (1999).
- 3) J. Kawabata, H. Ohshima, M. Ura, N. Jizo, K. Ito, A. Hamamura and S. Uesawa, "In-situ Remediation Case of VOC Contaminated Ground by Jet Grouting", Proceedings of the 13th Research Meeting on Groundwater and Soil Contamination and its Prevention Methods, pp.57-62 (2007).
- 4) K. Ito, J. Kawabata, T. Kawai, A. Ishii and S. Uesawa, "In-situ Remediation Method by Water Jet Technology for VOC Contaminated Ground", Technology News of Geo-Environmental Protection Center, No.6, pp.1-6 (2003).
- 5) U. S. EPA, "Permeable Reactive Barrier Technologies for Contaminant Remediation", EPA/600/R-98/125 (1998).
- 6) T. Ohshita, H. Ito, T. Inoue and T. Chida, "Evaluation of Trichloroethylene Reaction Pathway by Granular Iron", Proceedings of the 7th Research Meeting on Groundwater and Soil Contamination and its Prevention Methods, pp.271-274 (2000).
- 7) A. Mary and W. William, "Applied Groundwater Modeling Simulation of Flow and Advective Transport", p.41 (1992) Academic Press Inc..
- 8) M. Nishigaki, Mitsubishi Materials Inc., and Dia consultants Inc., "DTRANSU-3D・EL", Three dimensional Public Presentation Seminar (2001).
- 9) K. Spitz and J. Moreno, "A Practical Guide to Groundwater and Solute Transport Modeling", pp.368-372 (1996) John Wiley & Sons Inc..

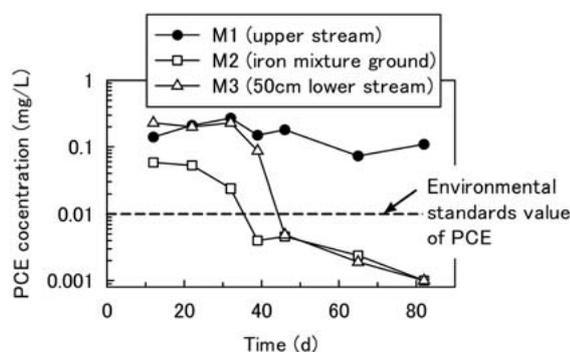


Fig. 16 PCE concentration analysis result in monitoring wells.