

浸透流解析に基づく反応透過壁工法の性能評価 とその最適設計法の提案

石森洋行¹・勝見 武²・深川良一³

¹ 学生会員 工修 立命館大学大学院 理工学研究科 (〒 525-8577 滋賀県草津市野路東 1-1-1)

² 正会員 工博 京都大学大学院 助教授 地球環境学堂 (〒 606-8501 京都府京都市左京区吉田本町)

³ 正会員 工博 立命館大学 教授 理工学部 (〒 525-8577 滋賀県草津市野路東 1-1-1)

反応透過壁工法の最適な形状条件・材料条件(設計パラメータ)を決定するために、設計パラメータと反応透過壁系の性能の関係および反応透過壁系の性能と汚染サイト特性の関係を調べた。前者の関係は、各設計パラメータに対する平面2次元浸透流解析によるパラメトリックスタディの結果から評価した。一方、後者の関係は、汚染地下水と反応壁の化学反応に基づく反応速度解析から評価した。これら2つの関係をもとに、汚染調査によって汚染サイト特性がわかった場合の、反応透過壁工法の最小施工費用を与える最適な設計パラメータを最適化問題として整理し、その最適解を見出した。その結果、反応透過壁工法の最適な設計パラメータを汚染濃度と汚染範囲に基づいて決定する手法を提案した。

Key Words : *contaminated groundwater, permeable reactive barrier, optimum design, seepage analysis, chemical reaction*

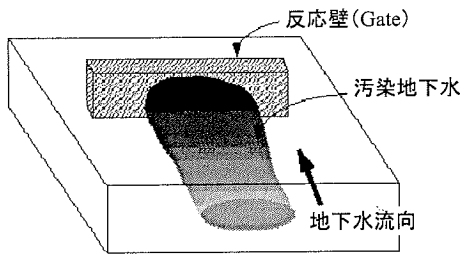
1. まえがき

トリクロロエチレンや六価クロムをはじめとする流動性の高い汚染物質による地下水汚染は、地下水流れに沿って帯水層中に広がり大規模な汚染を引き起こす場合が多い。わが国では、このような汚染地下水の浄化対策には、初期コストや施設導入の容易さから揚水処理が多く採用されてきた。この技術は、特に汚染源付近の高濃度領域を対象とした場合、大量の汚染物質を短時間で回収できる利点をもつ。しかし、帯水層に残存する汚染物質を完全に除去することは難しいため、長期の運転および維持管理が必要となる。このため近年では、維持管理コストの非常に小さい反応透過壁工法が、汚染地下水の効果的な原位置対策技術として注目を集めている。

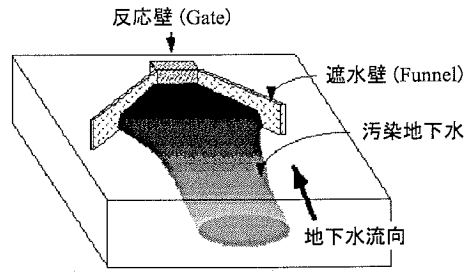
反応透過壁工法は、汚染地下水が流れてくると予想される場所に汚染物質を浄化する機能をもつ壁(反応壁)を設置し、汚染地下水がその壁を通過することにより地下水を浄化する工法である。反応壁の材料は、汚染地下水と反応して無害化する反応剤を、透水性を確保するために砂および礫と混合して作製する。これにより、地下水流れを損なわずに地下

水中に含まれる汚染物質を処理することが可能となる。また、反応壁を帯水層中に設置すれば従来の対策技術のような排水処理等は不要である。反応透過壁工法は、自然な地下水流れにまかせて汚染地下水の浄化を行うので、維持管理コストは小さくなる。反面、設備導入までに大規模な掘削工事を伴うことから初期コストは高くなる傾向にある。

本文は、反応透過壁工法の初期コストの低減を目的として、浸透流解析に基づいた反応透過壁工法の最適設計を提案するものである。なお本文では、帯水層中の揮発性有機塩素化合物による汚染を想定し、汚染領域が特定されていることを前提にした最適設計を提案している。また、汚染地下水の移流現象のみを考慮して解析を行っており、分散現象は無視している。反応透過壁工法は、地下水流れがある程度速い場合、すなわち分散よりも移流が卓越する場合に適用性が高いと考えられるためである。



(a) Continuous PRB



(b) Funnel-and-Gate System

図-1 反応透過壁工法の概念図

2. 反応透過壁工法

反応透過壁工法^{1),2)}は、Continuous PRB 工法（以下 cPRB）と Funnel-and-Gate System 工法（以下 FGS）の2つに大別される。図-1(a)に示す cPRB は、地盤に透水性の良い反応壁のみを設置し地下水流れを乱すことなく汚染地下水を浄化させるシステムである。これに対して、図-1(b)に示す FGS は、地下水流れを遮水壁（以下 Funnel）で1ヶ所に集中させ、そこに設置した反応壁（以下 Gate）を通過する汚染地下水を浄化させるシステムであり、cPRB に比べて低施工費用で実施できる特長をもつ。

Gate に使用される反応剤には、活性炭などの物理的な吸着性材料をはじめ、微生物などの生物学的な材料や、遷移金属あるいはその化合物などの化学反応を利用した材料があり、対象とする汚染物質の性質により多岐にわたる材料の適用が考えられる。そのため、反応剤を変えることで様々な物質による汚染に対応できる特長をもつ³⁾。表-1 に、Gate に使用される代表的な反応剤を示す。

反応透過壁の浄化メカニズムは、反応剤を含有した Gate を汚染地下水が通過することによって浄化される。通過中は Gate 内の反応剤と接触し、化学反応が生じる。一般に、反応剤には零価鉄粉 (Fe^0) が用いられることが多く、それは TCE や Cr(VI) による汚染に対して特に有効であるといわれている。前者は鉄粉の腐食により TCE の脱塩素反応が生じ、一方、後者は鉄粉の腐食により Cr(VI) の還元反応が生じて無害化される^{2),4),5)}。零価鉄粉を反応剤とする浄化メカニズムは、主に脱塩素反応と酸化還元反応によるものであるが、Gate 内部での生分解反応により NO_3^- や SO_4^{2-} を除去した例^{6),7)}もある。

反応透過壁工法の設計手法はこれまで数多くの研究者により研究されているが、その多くは cPRB に関するものである。cPRB は地下水流況を乱す Funnel を設置しないため、汚染地下水は周辺地盤の動水勾配、流速を維持したまま、Gate を通過することが

表-1 汚染物質と反応剤

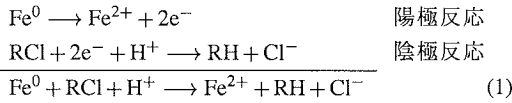
汚染物質	反応剤
【有機塩素系汚染物質】	
PCE, TCE, DCE	Fe^0
PCBs	Pd/Fe (Bimetallic metal)
【重金属系汚染物質】	
Cr(VI)	Fe^0 , Zeolite, SM slag
Cd, Zn, Cu, Pb, CN, Hg	Zeolite, SM slag
【窒素系汚染物質】	
Nitrogen ammonia	Zeolite
Phosphorous	SM slag, Wastelime
【硫酸系汚染物質】	
SO_4^{2-}	$\text{Al}(\text{OH})_3$, SM slag, Wastelime

できる。したがって、汚染領域の鉛直断面積と同等の断面積をもつ Gate を設置する必要がある。また、その Gate の厚さと充填すべき反応剤の量は、汚染地下水と反応剤の反応速度より決定される。反応速度は、汚染地下水と反応剤の反応を1次反応と仮定した反応速度解析から評価される。反応速度から汚染地下水が無害化されるまでの反応時間を評価し、その反応時間以上の間、Gate 内に汚染地下水を滞留させるように Gate の厚さと反応剤の量が決定される²⁾。一方、FGS は、Funnel の設置により、Gate 内の地下水流速は周辺地盤のそれに比べて高くなり、また汚染地下水の捕捉範囲も複雑化する。このような流況変動を定量的に評価することは困難であるため、明確な FGS の設計手法が確立されていないのが現状である。FGS の設計手法ないし、性能評価に関する研究は、例えば Starr と Cherry¹⁾ によって行われている。Starr と Cherry は平面2次元飽和定常浸透流解析により、Gate を通過する地下水流量（汚染地下水処理量）に対する Gate の幅、Gate の透水係数、Funnel の幅の影響を評価しており、また Funnel の角度の有効性を地下水流向の点から評価している。その結果、Gate の透水係数を周辺地盤の10倍以上にしても処理効果が向上しないと示されたが、具体的な Gate の幅と Funnel の幅の値を決定するまで至っていない。

3. 汚染地下水と反応剤の反応速度

(1) 揮発性有機塩素化合物と零価鉄粉の反応

揮発性有機塩素化合物と零価鉄粉の酸化還元反応では、図-2に示すように零価鉄粉が水と反応して鉄イオンに酸化される⁸⁾。揮発性有機塩素化合物は、この酸化反応で放出された自由電子を受け取ることで、脱塩(還元)されて無害化される。この脱塩素過程は、次の反応式により表わされる^{9),10),11)}。



揮発性有機塩素化合物の代表的な汚染物質であるトリクロロエチレン(以下TCE)やテトラクロロエチレン(以下PCE)は、1分子中に3ないし4個の塩素原子を有する。そのため、TCEやPCEと零価鉄粉の反応は、式(1)が逐次的に起って、最終的に塩素原子の無いエチレンとなる。この逐次反応の詳細は零価鉄粉や反応系の状態に依存するため明確に示すことはできないが、大局的に図-3のように進むと考えられている⁴⁾。

(2) 反応速度解析

反応透過壁工法の設計を行う際には、反応壁に流れ込んだ汚染地下水を清浄にするだけの浄化性能をもつように設計する必要がある。言い換えれば、汚

染地下水が反応壁を通過する時間(すなわち滞留時間: Retention Time)内に図-3の脱塩素過程を進め、人体に無害な物質、エチレンにまで変化させなければならない。このとき、汚染地下水が零価鉄粉と接触し始めてから無害化されるまでの反応時間(以下Residence Time)が重要になる。

Residence Timeは、次の連立常微分方程式を解くことにより計算される^{12),13)}。

$$\begin{aligned} \frac{d[A]}{dt} &= -(k_{SA})_A a_s \rho_m [A] \\ \frac{d[B]}{dt} &= a_s \rho_m ((k_{SA})_A [A] - (k_{SA})_B [B]) \\ \frac{d[C]}{dt} &= a_s \rho_m ((k_{SA})_B [B] - (k_{SA})_C [C]) \\ \frac{d[D]}{dt} &= a_s \rho_m ((k_{SA})_C [C] - (k_{SA})_D [D]) \end{aligned} \quad (2)$$

ここに、A:PCE, B:TCE, C:cis-1,2-DCE, D:VCを表わし、[A]~[D]:各汚染物質の濃度、 $(k_{SA})_A \sim (k_{SA})_D$:比反応速度定数[L/T]、 a_s :反応剤比表面積[L²/M]、 ρ_m :反応剤質量濃度[M/L³] (単位体積の汚染地下水に投与する反応剤の総質量)を表わす。比反応速度定数 k_{SA} は反応剤の単位表面積で標準化された反応速度定数(減衰定数) k [1/T]を表わし^{3),14),15)}、 $k = k_{SA} a_s \rho_m$ の関係がある。反応剤質量濃度 ρ_m と反応剤充填率 ϕ [-](反応壁の全固層(反応剤+土粒子)体積に対する反応剤体積の割合)の間には次式の関係が成り立つ。

$$\rho_m = \phi (1 - n_{gate}) \rho_r / n_{gate} \quad (3)$$

ここに、 n_{gate} :反応壁の(有効)間隙率、 ρ_r :反応剤の密度を表わす。反応剤の量を表わすパラメータ ρ_m と ϕ には互いに従属し合う関係にある。そのため以後、反応剤の量を表わすパラメータは反応剤充填率 ϕ に統一するものとする。

式(2)の連立常微分方程式を解けば、図-4に示すような曲線が得られる。この図から、汚染物質A~Dを所定の浄化目標濃度(ここでは、図-3に示す地下水環境基準値を採用する)にまで減衰させるために必要なResidence Timeを次式により算出する。

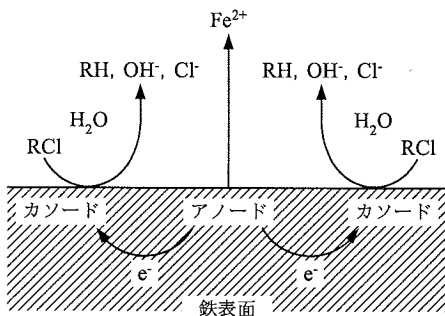


図-2 鉄表面における脱塩素反応の概念図

構造式	<chem>ClC(Cl)=C(Cl)Cl</chem>	<chem>ClC(Cl)=CCl</chem>	<chem>ClC(Cl)=C</chem>	<chem>ClC=C</chem>	<chem>C=C</chem>
物質名	PCE	TCE	cis-1,2-DCE	VC	Ethene
地下水環境基準値	0.01 mg/L	0.03 mg/L	0.04 mg/L	(0.04 mg/L)	None

注) VCの環境基準値は定められていないが、本文では0.04 mg/Lと仮定する。

図-3 PCEと零価鉄粉の代表的な反応経路

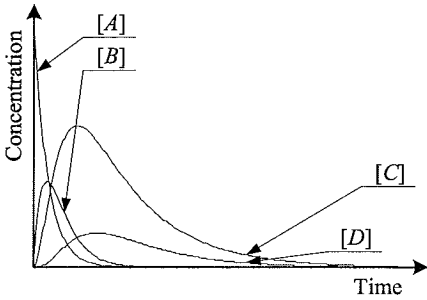


図-4 逐次反応における汚染濃度と反応時間の関係

$$\text{Residence Time} = \text{Max}_{P=A \sim D} \left(t \mid [P]=[P]_{\text{allow}} \right) \quad (4)$$

ここに、 P : 汚染物質 A~D を表わす指標, $[P]_{\text{allow}}$: 汚染物質 P の浄化目標濃度 (環境基準値) を表わす. 式 (2) より Residence Time を計算した例を表-2 に示す. 反応剤 (鉄粉) の比反応速度定数は文献^{12),13)} を参考にし, 汚染濃度は TCE の飽和溶解度を参考にした.

計算結果である表-2 をみると, いかなる汚染濃度条件においても Residence Time は 1 日にも満たない値となった. つまり, 汚染物質と反応剤を 1 日間も接触させ続ければ, 汚染物質を十分に浄化することができる. したがって, 反応壁に流れ込んだ汚染地下水を清浄にするだけの浄化性能をもつように設計するためには, 反応壁内での汚染地下水の滞留時間 (Retention Time) を 1 日間程度確保すればよい. 地盤中を流れる地下水流速を考えれば, 所要の浄化性能をもつように反応壁を設計するのは容易であると考えられる. なお本計算では, 反応壁に流れ込んだ汚染地下水は必ず反応剤と接触するという仮定のもと計算している. 反応剤充填率が極端に小さい場合, 汚染地下水が反応剤に接触しないまま反応壁を通過してしまう可能性が高くなる. このときの Residence Time を式 (2) より評価すると, その値は実際よりも小さくなり, 反応壁が危険側に設計される. 反応剤充填率が小さい場合の Residence Time を評価す

る際には, 汚染地下水と反応剤の接触確率を考慮した上で, 反応速度解析を行う必要がある. しかしながら, 反応壁の施工時において小さな反応剤充填率 (例えば, $\phi = 5\%$) の条件で反応剤と土を均一に混合するのは難しいため, ある程度の反応剤充填率が必要と考えられる. そのため, 実務上での反応剤充填率の範囲内では, 反応剤との接触確率を考慮せずとも, Residence Time が小さく評価されることはない.

4. 反応透過壁工法の性能評価

(1) 概要

反応透過壁工法の設計を行う際には, 前述した所要の浄化性能をもつことに加えて, 汚染地下水を捕捉するための集水性能をもつように設計しなければならない. 浄化性能は汚染地下水の Gate 内での滞留時間 (以下 Retention Time) で評価し, また集水性能は汚染地下水の捕捉幅 (以下 Capture Width) で評価することができる. これらは反応透過壁工法の設計パラメータである幾何条件や物性条件に依存するため, その依存性を平面 2 次元飽和定常浸透流解析から評価した.

(2) 基礎方程式

地盤中の微小要素への質量収支を考え, 質量保存則を導くと次式が成立する.

$$\frac{\partial \rho \theta}{\partial t} + \frac{\partial \rho u_i}{\partial x_i} = 0 \quad (5)$$

ここに, ρ : 水の密度, θ : 体積含水率, u : 地下水流速を表わす. 地下水流速 u は, ダルシーの法則を準用して次式で与えられる.

$$u_i = -K_{ij} \frac{\partial H}{\partial x_j} \quad (6)$$

表-2 揮発性有機塩素化合物を環境基準値まで減衰させるのに必要な Residence Time の計算例

初期汚染濃度 (mg/L)				比反応速度定数 (m/day)				密度 (g/m ³)	比面積 (m ² /g)	充填率 (%)	間隙率	Residence Time (day)
[A] ₀	[B] ₀	[C] ₀	[D] ₀	(k _{SA}) _A	(k _{SA}) _B	(k _{SA}) _C	(k _{SA}) _D	ρ_r	a_s	ϕ	n_{gate}	
10	0	0	0							20		0.044
100	0	0	0							20		0.058
1000	0	0	0	5.04	9.36	9.84	1.20			20		0.073
1000	0	0	0	×	×	×	×	6.8 × 10 ⁶	0.10	5	0.45	0.290
1000	0	0	0	10 ⁻²	10 ⁻³	10 ⁻⁴	10 ⁻³			10		0.145
1000	1000	0	0							20		0.077
1000	1000	1000	0							20		0.079

注) A: PCE, B: TCE, C: cis-1,2-DCE, D: VC を表わす.

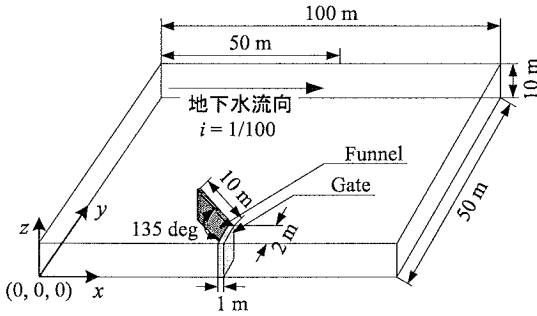


図-5 解析空間

表-3 解析条件

	単位	2D	Semi-3D	3D
透水係数				
周辺地盤	cm/s	5.0×10^{-3}	5.0×10^{-3}	5.0×10^{-3}
Gate	cm/s	5.0×10^{-2}	5.0×10^{-2}	5.0×10^{-2}
Funnel	cm/s	5.0×10^{-6}	5.0×10^{-6}	5.0×10^{-6}
有効間隙率				
周辺地盤	—		0.30	
Gate	—		0.30	
Funnel	—		0.15	
VG パラメータ: α				
周辺地盤	1/cm			0.138
Gate	1/cm			0.138
Funnel	1/cm			0.005
VG パラメータ: n				
周辺地盤	—			1.592
Gate	—			1.592
Funnel	—			1.090

注) 2D : 式 (7), Semi-3D : Forcheimer の式, 3D : Richard の式を表わす。

ここに, K_{ij} : 透水係数テンソル, H : 全水頭を表わす。式 (5) に式 (6) を代入し定常条件を仮定すれば, 平面 2次元飽和定常浸透流方程式が次式により導かれる。なお, 水は非圧縮性としている。

$$\frac{\partial}{\partial x_i} \left(K_{ij} \frac{\partial H}{\partial x_j} \right) = 0 \quad (7)$$

(3) 基礎方程式の妥当性

反応透過壁工法の性能評価を行うための基礎方程式として式 (7) が妥当であるかを検証するために, 図-5 に示す場に発生する地下水位変化を, 不圧帯水層での地下水流れを表わす準 3次元浸透流方程式 (Forcheimer の式¹⁶⁾) および飽和・不飽和土での地下水流れを表わす 3次元浸透流方程式 (Richard の式¹⁷⁾) を使用した解析結果と比較した。

解析空間は図-5 に示すように, FGS の対称性を利用して片半分とした。地下水流向は x 軸方向で, 動水勾配 $i = 1/100$ と仮定し, 解析空間の左端の地下水面高を 5 m とした。また, Gate の幅を 2 m, Gate の厚さを 1 m, Funnel の厚さを 1 m とした。その他の解析条件は表-3 に示すとおりである。土の水分特性およ

表-4 初期条件と境界条件

	初期条件	境界条件
2D		$H(0, y) = 5$ $H(100, y) = 4$
Semi-3D	$H(x, y, 0) = \sqrt{25 - 0.09x}$	$H(0, y, t) = 5$ $H(100, y, t) = 4$
3D	$H(x, y, z, 0) = \sqrt{25 - 0.09x}$	$H(0, y, z, t) = 5$ $H(100, y, z, t) = 4$

注) 2D : 式 (7), Semi-3D : Forcheimer の式, 3D : Richard の式を表わす。表中の単位は m である。

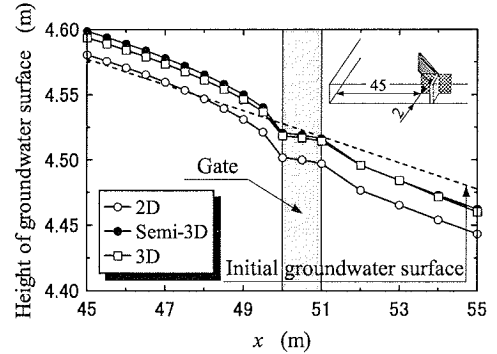


図-6 15日後の Gate 前背面部における地下水位分布

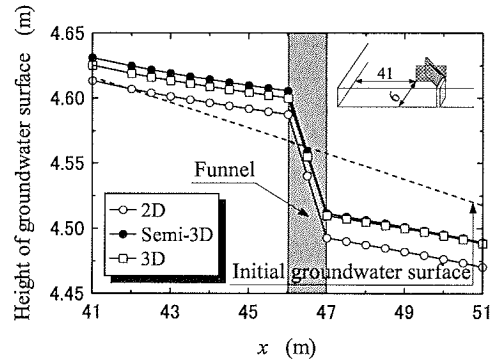


図-7 15日後の Funnel 前背面部における地下水位分布

び不飽和浸透特性には van Genuchten の提案式¹⁸⁾ を使用しており, そのパラメータ α , n は, 水分特性曲線および不飽和浸透特性曲線の形状を決定するパラメータである^{19), 20)}。それぞれの基礎方程式の初期条件および境界条件を表-4 に示す。なお, 初期条件は FGS を設置する前の状態とし, その全水頭は準 3次元浸透流方程式 (Forcheimer の式) の定常解を利用して与えた。

FGS 設置から 15 日後の解析結果を図-6 と図-7 に示す。図-6 は, 解析空間における座標 $x = 45, y = 2$ を通過し x 軸に平行な面, すなわち Gate と Funnel の境界を通過する地下水位分布を表わしたものである。一方, 図-7 は, 解析空間における座標 $x = 41, y =$

6を通過しx軸に平行な面、すなわちFunnel前面部と背面部の地下水位分布を表わしたものである。なお、図中の破線はFGSを設置する前の地下水位分布を表わしている。これらの図から、予想される地下水面の形状(勾配)はいずれの基礎方程式を使用してもほぼ等しく、また、式(7)から予測される地下水面は他の基礎方程式から予測される地下水面よりも低いことが確認できる。式(7)から予測される地下水面が他に比べて低い理由として、式(7)には不圧帯水層における水の貯留や水を吸い上げるサクシジョンの影響が考慮されていないことが挙げられる。一方で、水の貯留の影響を考慮されたForcheimerの式とRichardの式は、ともにほぼ同じ解析結果となっている。

反応透過壁工法の性能評価指標として地下水流速から評価される浄化性能、流線から評価される集水性能を使用するため、地下水面高よりも地下水面の形状(動水勾配)が重要となる。いずれの基礎方程式を使用しても地下水面の勾配はほぼ等しいため、計算される流速および流線はほぼ等しいと考えられる。そのため、反応透過壁工法の性能評価を行うための基礎方程式として式(7)は妥当であると結論付けた。

(4) 性能評価の手法と条件

式(7)に対して有限要素法を使用してパラメトリックスタディを行った。解析平面図を図-8に示す。解析平面は、前節と同様に、FGSの対称性を利用して片半分としている。地下水流向はx軸方向で、動水勾配 $i = 1/100$ と仮定し、Funnelの厚さを1mとした。解析メッシュは解析平面図を幅0.1~5mで矩形分割した(総節点数30246, 総要素数29892)。その他の解析条件は図中に示すとおりである。境界条件は、図-9に示すように、解析平面の左端および右端に水位固定型の境界値を与えた。解析は表-5に示すように、Gateの幅(W_{gate})、Gateの厚さ(L_{gate})、Funnelの幅(W_{funnel})、Gateの透水係数(k_{gate})、Funnelの透水係数(k_{funnel})をそれぞれパラメトリックに変化させて行い、Retention TimeとCapture Widthに対する依存性を評価した。

FGSの浄化性能を表わす指標Retention Timeは汚染

地下水のGate内での滞留時間を表わし、浸透流解析から得られるGate内流速の最大値をもって次式により計算する(図-10参照)。

$$\text{Retention Time} = \frac{\text{Min}}{0 \leq y' \leq W_{gate}} \left(\frac{L_{gate}}{u_x(y')} \right) \quad (8)$$

この値が大きいほど、汚染地下水はGate内の反応剤と長時間接触することになり浄化性能は高くなる。Retention Timeは周辺地盤透水係数や動水勾配の影響を受けるためEquivalent Retention Lengthという指標をもって標準化する。

$$\begin{aligned} \text{Equivalent Retention Length} \\ = \text{Retention Time} \times k_{aquifer} \times i \end{aligned} \quad (9)$$

ここに、 $k_{aquifer}$:周辺地盤透水係数、 i :動水勾配を表わす。一方、集水性能を表わす指標Capture Widthは汚染地下水の捕捉幅を表わし、浸透流解析より得られる流線²¹⁾から次式により計算する(図-11参照)。

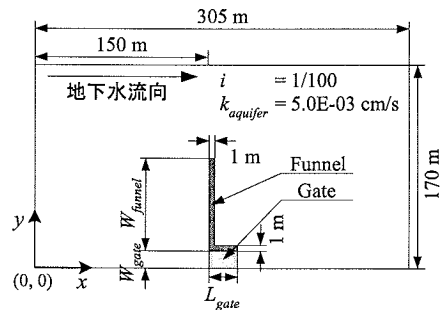


図-8 パラメトリックスタディの解析平面図

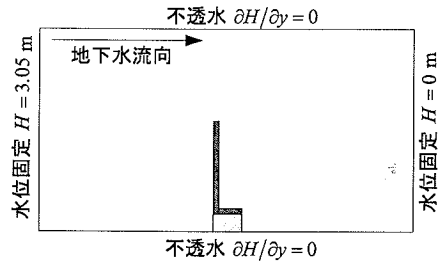


図-9 パラメトリックスタディの境界条件

表-5 パラメトリックスタディの解析条件

	W_{gate} (m)	L_{gate} (m)	W_{funnel} (m)	$k_{gate}/k_{aquifer}$	$k_{funnel}/k_{aquifer}$
GW-Series	0.75~15	1	12	10	0.001
GL-Series	6	0.1~1	12	10	0.001
FW-Series	6	1	0~75	10	0.001
GC-Series	6	1	12	0.1~1000	0.001
FC-Series	6	1	12	10	0.00001~0.001

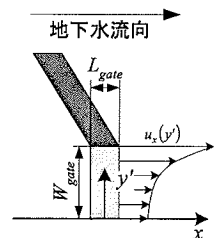


図-10 Retention Timeの説明図

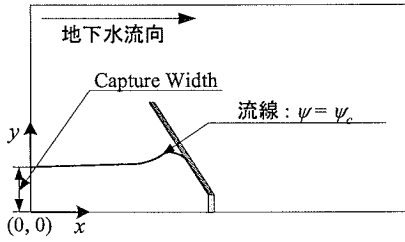


図-11 Capture Width の説明図

$$\text{Capture Width} = y \Big|_{x=0, \psi=\psi_c} \quad (10)$$

ここに、 ψ_c : Gate と Funnel の境界部における流れ関数を表わす。

(5) 解析結果

a) Gate の幅による影響

GW-Series の解析結果を図-12 に示す。Equivalent Retention Length は Gate 内での地下水流速，すなわち Gate 単位幅あたりの汚染地下水処理量に依存する。そのため、Gate の幅を増加させても Gate 単位幅あたりの汚染地下水処理量に著しい影響を与えるとは考えられないので、Equivalent Retention Length に対する影響も少ないと考えられる。一方、Capture Width への影響は、Gate の幅を増加させると Capture Width に線形的な増加がみられた。また、その勾配はほぼ1に近いことから Gate の幅がそのまま Capture Width に影響したと考えられる。

b) Gate の厚さによる影響

GL-Series の解析結果を図-13 に示す。Gate の厚さを増加させると Equivalent Retention Length に線形的な増加がみられた。これは、Gate の厚さを増加させることによって汚染地下水の Gate 内での滞留時間が増加したためである。一方、Capture Width への影響はほとんどみられなかった。

c) Funnel の幅による影響

FW-Series の解析結果を図-14 に示す。Funnel の幅を増加させると Equivalent Retention Length に減少がみられた。これは Funnel の幅の増加に伴い集水範囲が増加し、Gate 単位幅あたりの汚染地下水処理量が増加したためと考えられる。一方、Capture Width への影響は、Funnel の幅を増加させると Capture Width に線形的な増加がみられた。

d) Gate の透水係数による影響

GC-Series の解析結果を図-15 に示す。図-15 の横軸は Gate の透水係数と周辺地盤透水係数の比で定義している。Equivalent Retention Length への影響は、Gate の透水係数比が10以上になるとその影響がほぼなくなった。これは、Gate の透水係数を増加させても

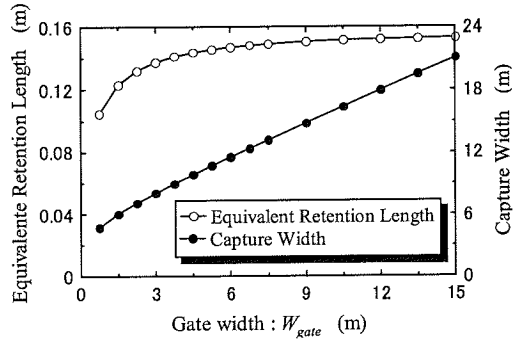


図-12 Gate の幅の影響

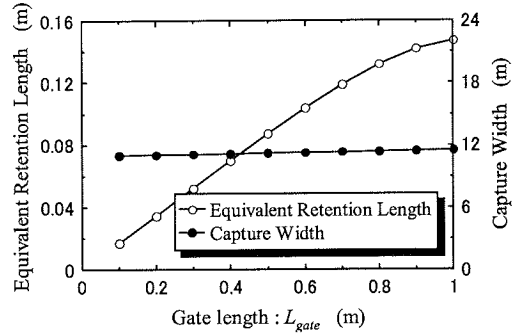


図-13 Gate の厚さの影響

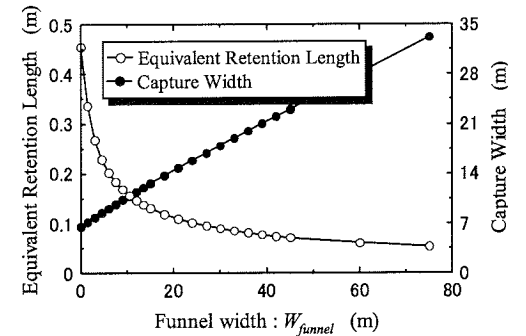


図-14 Funnel の幅の影響

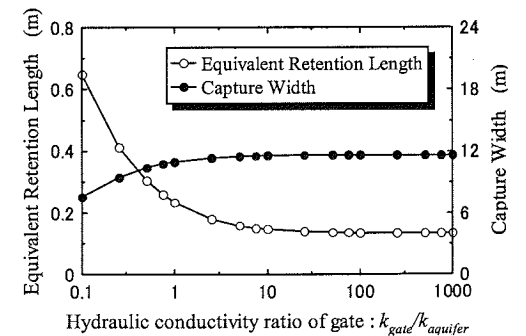


図-15 Gate の透水係数の影響

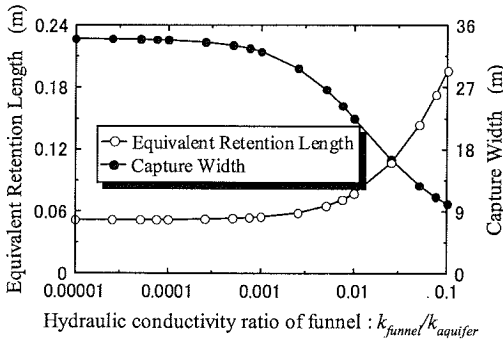


図-16 Funnelの透水係数の影響

表-6 各設計パラメータを増加させたときのEquivalent Retention LengthとCapture Widthに対する影響力

	Equivalent Retention Length	Capture Width
Gateの幅	○	◎
Gateの厚さ	◎	△
Funnelの幅	▲	△

注) 表中の記号は影響力を示す(◎大, ○中, △小).
白抜きは増加する影響を, 黒塗りは減少する影響を示す.

Gate背面の地盤の透水係数がGateのそれよりも著しく低いために, Gateからの地下水の流出を妨げているためと考えられる. 一方, Capture Widthへの影響もGateの透水係数比が10以上になるとその影響はほとんど現れなくなった.

e) Funnelの透水係数による影響

FC-Seriesの解析結果を図-16に示す. 図-16の横軸はFunnelの透水係数と周辺地盤透水係数の比で定義している. Equivalent Retention Lengthへの影響は, Funnelの透水係数比が1/1000以下になるとその影響がほとんど現れなくなった. 一方, Capture Widthへの影響もFunnelの透水係数比が1/1000以下になるとその影響がほとんど現れなくなった. なお, Equivalent Retention LengthとCapture Widthに影響を及ぼさないFunnelの透水係数比はFunnelの幅に依存する. Funnelの幅が増加するとFunnelの中央部より汚染地下水が流出する危険性が増えるため, Funnelの幅を長く施工する際にはより高い遮水性をもったFunnelが求められる.

(6) 透水係数の最適条件

FGSの設計パラメータに対してパラメトリックスタディを行ったところ, 次のことが明らかになった. Equivalent Retention LengthとCapture Widthに対して著しい影響を与える透水係数比で設計を行えば, 施工時の作業や周辺地盤, Gateの不均一性に

る微小な透水係数の変化により, FGSの性能は大きく変化する. したがって, Gateの透水係数とFunnelの透水係数は, FGSの浄化性能(Equivalent Retention Length)と集水性能(Capture Width)に及ぼす影響が少ない次の条件で施工するのが望ましいと考えられる.

$$k_{gate}/k_{aquifer} \geq 10 \quad (11)$$

$$k_{funnel}/k_{aquifer} \leq 1/1000 \quad (12)$$

これらの条件を満たすとき, 所要の性能を保持したFGSが施工しやすいと考えられる. このとき, FGSの浄化性能と集水性能はFGSの幾何条件(Gateの幅, Gateの厚さ, Funnelの幅)のみに依存する. その依存性は図-12~14の勾配により評価することができ, それを表-6に整理した. なお, $k_{aquifer}$ が小さい難透水層の場合には地下水流速が小さくなるため, 汚染地下水を浄化するまでに多大な時間を必要とする. このため, 地下水流れが良好な砂質土程度の透水係数 $k_{aquifer}$ をもつ地盤に対して式(11), 式(12)を適用することが現実的と考えられる.

式(11), 式(12)を満足する条件下では, Equivalent Retention LengthとCapture WidthはGateの幅, Gateの厚さ, Funnelの幅のみに依存するので, 任意関数 f, g を使用して次式で与えられる.

$$\text{Equivalent Retention Length} = f(W_{gate}, L_{gate}, W_{funnel}) \quad (13)$$

$$\text{Capture Width} = g(W_{gate}, L_{gate}, W_{funnel}) \quad (14)$$

任意関数 f, g は図-17, 図-18に示すような開曲面を描くような関数となる. なお, 図中のE.R.L.とは

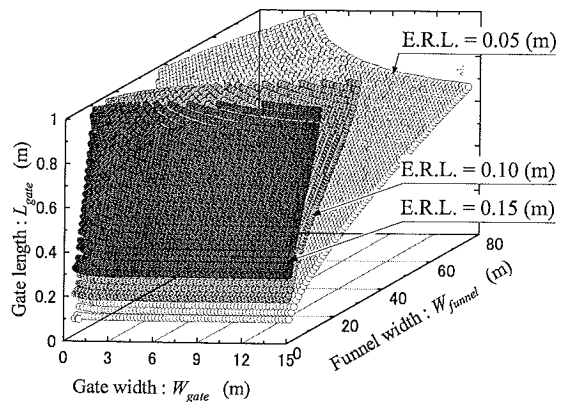


図-17 Equivalent Retention Length (E.R.L.) に対するFGS幾何条件の影響

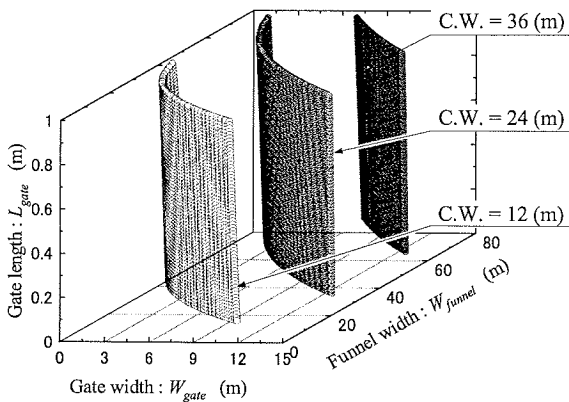


図-18 Capture Width (C.W.) に対する FGS 幾何条件の影響

Equivalent Retention Length を, C.W. は Capture Width を表わす. この関数の回帰式を導くことは FGS の最適設計を行う上で有用であると考えられるが, 同時にその回帰式の精度も重要となる. 本研究においては高い精度をもつ回帰式を同定するまでに至っていないので, 本文では図-17, 図-18 を構成する数値データをそのまま FGS の最適設計に使用した.

5. 汚染サイト特性に応じた最適設計パラメータの同定

(1) 概要

FGS 設計方法の考え方は, Gate へ流入する高濃度の汚染地下水を低濃度まで減衰させる浄化性能をもつこと, そして対象とする汚染範囲を補足する集水性能をもつことである. 汚染調査から得られる汚染濃度, 汚染範囲から所要の性能を満たす FGS の設計条件 (Gate の幅, Gate の厚さ, Funnel の幅, 反応剤充填率) を見出し, その中から最も施工費用が低くなる条件をパラメトリックスタディの結果から検討した. なお, Gate と Funnel の透水係数は, 最適条件式 (11) と式 (12) を満足しているものとする.

(2) 最適化問題への定式化

本文における FGS の設計は, 設計パラメータと FGS の性能の関係および FGS の性能と汚染サイト特性の関係に着目している. その関係を図-19 に示す. 図-19 は, 汚染調査より得られるサイトの汚染濃度や汚染範囲といった情報から, FGS の最適設計パラメータを取得するまでの流れを示している.

まず, 汚染濃度や汚染範囲といった情報からその

汚染サイトを浄化するのに必要な FGS の浄化性能と集水性能を検討する. このとき, 浄化性能については 3 章で示した Residence Time 以上の Retention Time が必要になり, 集水性能については図-20 に示す Plume Width 以上の Capture Width が必要になる. なお, Plume Width とは地下水流向に対して垂直な軸に関する汚染範囲の半分の幅を表わす.

次に, 前述のとおり検討された所要の Retention Time および Capture Width となるような FGS の設計パラメータ (Gate の幅, Gate の厚さ, Funnel の幅) を, 図-17, 図-18 から見出す. 所要の Retention Time および Capture Width となるような FGS の設計パラメータの組み合わせは何通りも考えられるため, その中から最も施工費用が低くなる組を最適設計パラメータとする.

以上を最適化問題と考え, 目的関数と制約条件式を定義した. 目的関数には, 施工費用の最小化を挙げ次式で定義する.

【Minimize】

$$\text{Cost index} = a W_{gate} L_{gate} + b W_{funnel} + c \phi (1 - n_{gate}) W_{gate} L_{gate} D \quad (15)$$

ここに, Cost index: 施工費用を表わす指標, a : 所定の深度まで Gate を 1 m² 施工するために必要な費用係数 (反応剤の費用は対象外), b : 所定の深度まで Funnel を 1 m 施工するために必要な費用係数 (Funnel は層厚の薄いシートパイルや連続地中壁によって構築されることが多いため, Funnel の費用はその幅のみに依存するものと仮定した), c : 反応剤を 1 m³ 含有させるために必要な費用係数, D : 施工深度を表わす. 制

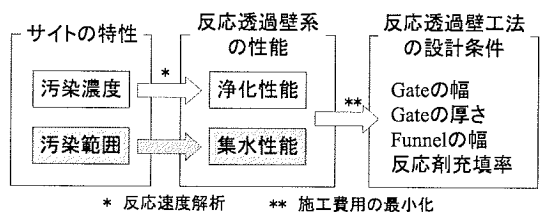


図-19 汚染サイト特性から反応透過壁工法の最適設計条件を求めるまでの主要な流れ

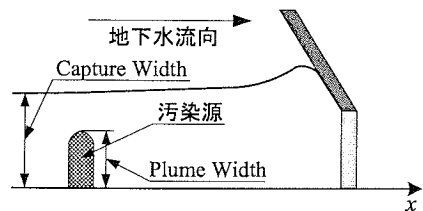


図-20 Capture Width と Plume Width の関係

約条件式には、所要の浄化性能と集水性能を満足することを挙げ次式で定義する。

【Subject to】

$$n_{gate} \text{ Retention Time} \geq \text{Residence Time} \quad (16)$$

$$\text{Capture Width} \geq \text{Plume Width} \quad (17)$$

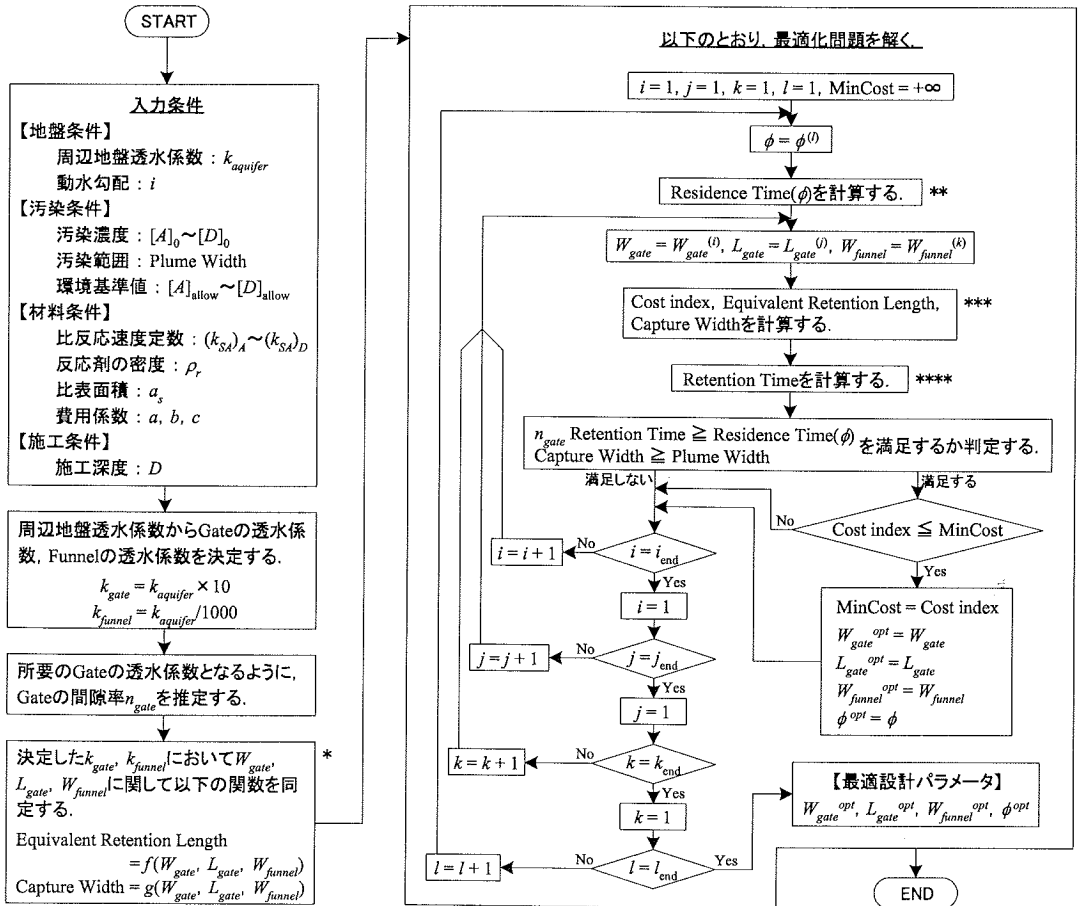
式(16)は、FGSが汚染地下水を浄化することのできる浄化性能をもつための式である。この式が満足されないと、汚染地下水が所定の浄化目標濃度にまで減衰されないままGateを通過してしまう。なお、Retention Timeはダルシー流速により評価しているため、実流速で評価するためにGateの(有効)間隙率 n_{gate} を掛けている。一方、式(17)は、FGSが汚染地下水を集水することのできる集水性能をもつための式である。この式が満足されないと、汚染地下水はGateへ導かれずにFunnel側方より流出してしまう。

Residence Timeは表-2に示すとおり ϕ の関数であり、Retention Time (Equivalent Retention Length)とCapture Widthは式(13)、式(14)が示すとおり W_{gate} 、 L_{gate} 、 W_{funnel} の関数である。したがって、式(15)~(17)中の変数は設計パラメータである W_{gate} 、 L_{gate} 、 W_{funnel} 、 ϕ の4つとなる。

(3) 最適化問題の解法例

式(15)~(17)からなる最適化問題を解けば、最小の施工費用を与える最適解(最適設計パラメータ)が得られる。計算方法には、各変数 W_{gate} 、 L_{gate} 、 W_{funnel} 、 ϕ にある仮定した値を順次パラメトリックに変化させて代入し、制約条件式を満たし、なおかつ目的関数の最小値を与えたときの変数値を最適値とする方法を使用した。最適解を求めるまでの流れ図を図-21に示す。

図-21は、ある仮定した $W_{gate}^{(i)}$ 、 $L_{gate}^{(j)}$ 、 $W_{funnel}^{(k)}$ 、 $\phi^{(l)}$



* 図-17、図-18 参照

*** 同定された関数 f 、 g および式(15)から計算

** 表-2 参照

**** 式(9)から計算

図-21 最適化問題の解法例

に対して、

- (1) 反応速度解析を行い、Residence Time($\phi^{(l)}$) を計算する。
- (2) 目的関数である式 (15) に $W_{gate}^{(i)} \sim \phi^{(l)}$ を代入し、Cost index ($W_{gate}^{(i)}, L_{gate}^{(j)}, W_{funnel}^{(k)}, \phi^{(l)}$) を計算する。
- (3) 浸透流解析を行い、Equivalent Retention Length ($W_{gate}^{(i)}, L_{gate}^{(j)}, W_{funnel}^{(k)}$) と Capture Width ($W_{gate}^{(i)}, L_{gate}^{(j)}, W_{funnel}^{(k)}$) を計算する。
- (4) 式 (9) を使用して、計算された Equivalent Retention Length を Retention Time に変換する。
- (5) 制約条件式 (式 (16) および式 (17)) を満足するか判定する。
- (6) (5) での制約条件式を満足し、(2) で計算された Cost index がこれまで計算された Cost index よりも小さいならば、 $W_{gate}^{opt} = W_{gate}^{(i)}, L_{gate}^{opt} = L_{gate}^{(j)}, W_{funnel}^{opt} = W_{funnel}^{(k)}, \phi^{opt} = \phi^{(l)}$ と値を更新する。

を行い、仮定する値 $W_{gate}^{(i)}, L_{gate}^{(j)}, W_{funnel}^{(k)}, \phi^{(l)}$ を順次連続的に変化させ、上記の項目を繰り返すものである。なお、 $W_{gate}^{(i)}, L_{gate}^{(j)}, W_{funnel}^{(k)}, \phi^{(l)}$ はパラメトリックに仮定される値を表わす。 $i \sim l$ はそれぞれ $W_{gate}, L_{gate}, W_{funnel}, \phi$ の標本点を表わし、 i は 1 から i_{end} まで、 j は 1 から j_{end} まで、 k は 1 から k_{end} まで、 l は 1 から l_{end} まで動く。例えば、 $1 \leq i \leq 5$ の場合、 W_{gate} は 5 ケース、パラメトリックに変化させている。 $i_{end} \sim l_{end}$ はそれぞれの総標本数を表わす。

この方法における最適解の保証は、仮定する変数値 $W_{gate}, L_{gate}, W_{funnel}, \phi$ の定義域に依存する。定義域が狭ければ、真の最適解が定義域外にある可能性があり、最適性を保証することはできない。このとき、計算から得られる 4 つの最適解 $W_{gate}^{opt}, L_{gate}^{opt}, W_{funnel}^{opt}, \phi^{opt}$ のうち少なくとも 1 つは、その定義域の境界値で得られる。このように、最適解の保証が得られない場合には、各変数の定義域を広くする、もしくは適切な計算条件に変更する（例えば、汚染濃度や汚染範囲を小さくする）必要がある。

(4) 計算条件

計算条件を表-7に示す。FGSの最適設計において対象とする汚染サイトには、汚染物質 PCE が 10~1000 mg/L 存在し、その汚染範囲が 5~15 m であると仮定した。各汚染物質の浄化目標値には、各環境基準値を設定した。なお、VCには環境基準値が定められていないため、本計算においては 0.04 mg/L とした。費用係数 a, b については、Gate と Funnel を施工するために必要な費用は同じであると仮定した。Funnel の施工費用については、柱列式連続壁工法を想定し、この工法における 1 m² あたりの施工費

表-7 最適化問題の計算条件

	単位	値
周辺地盤透水係数: $k_{aquifer}$	cm/s	5.0×10^{-3}
動水勾配: i	—	1/100
Gate の間隙率: n_{gate}	—	0.45
反応剤の密度: ρ_r	g/m ³	6.8×10^6
反応剤の比表面積: a_s	m ² /g	0.10
反応速度定数: $(k_{SA})_A$	m/day	5.04×10^{-2}
: $(k_{SA})_B$	m/day	9.36×10^{-3}
: $(k_{SA})_C$	m/day	9.84×10^{-4}
: $(k_{SA})_D$	m/day	1.20×10^{-3}
施工深度: D	m	6
浄化目標値: $[A]_{allow}$	mg/L	0.01
: $[B]_{allow}$	mg/L	0.03
: $[C]_{allow}$	mg/L	0.04
: $[D]_{allow}$	mg/L	0.04
Gate の費用係数: a	1/m ²	1
Funnel の費用係数: b	1/m ²	1
反応剤の費用係数: c	1/m ²	600
初期汚染濃度: $[A]_0$	mg/L	10~1000
: $[B]_0$	mg/L	0
: $[C]_0$	mg/L	0
: $[D]_0$	mg/L	0
汚染範囲: Plume Width	m	5~15

注) A: PCE, B: TCE, C: cis-1,2-DCE, D: VC を表わす。

用 9,000~12,000 円を参考とした (H 鋼なし)。費用係数 c については、市販されている鉄粉 5 kg あたりの費用 4,400 円を参考とした (同和鉄粉)。以上から、費用係数 $a \sim c$ の間には、おおむね $a : b : c = 1 : 1 : 600$ という比が算出される。

最適化問題における制約条件式中の FGS の性能を表わす Equivalent Retention Length および Capture Width については、4 章での解析結果である図-17、図-18 をそのまま使用した。なお、本計算における各変数の定義域は $0.75 \text{ m} \leq W_{gate} \leq 15 \text{ m}$, $0.1 \text{ m} \leq L_{gate} \leq 1 \text{ m}$, $0 \text{ m} \leq W_{funnel} \leq 75 \text{ m}$, $1 \% \leq \phi \leq 100 \%$ である。最適解は、この定義域内で得られる。

(5) 計算結果

計算結果を図-22、図-23に示す。図-22は汚染範囲 Plume Width = 5 m と固定した場合に、サイトの汚染濃度の大きさによって FGS の最適設計パラメータがどのように変化するかを表わしたものである。その結果、いずれの汚染濃度においても FGS 設計パラメータの最適値はほぼ同じとなった。サイトの汚染濃度が変われば、特に Gate の厚さと反応剤充填率に影響を与えると考えられるが、いずれの汚染濃度においても実際に施工できないほど非常に小さい値 $L_{gate}^{opt} = 0.1 \text{ m}$, $\phi^{opt} = 2 \%$ 近傍となった。一方、図-23は汚染濃度 $[A]_0 = 10 \text{ mg/L}$ と固定した場合に、サイトの汚染範囲の大きさによって FGS の最適設計パ

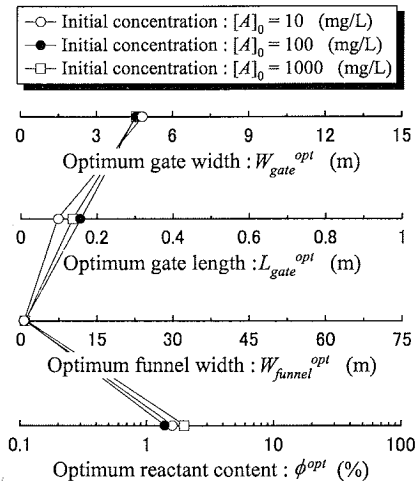


図-22 汚染濃度による最適値への影響

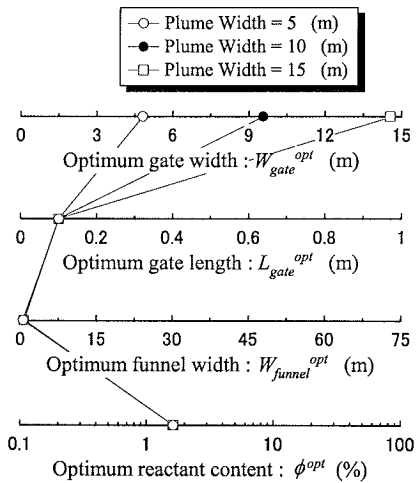


図-23 汚染範囲による最適値への影響

ラメータがどのように変化するかを表わしたものである。その結果、汚染範囲が変われば、Gateの幅のみに著しい影響を与えた。本計算においていずれの場合も $W_{funnel}^{opt} = 0$ m 近傍であったため、Funnel 設置の有効性が確認されなかった。Funnel 設置の有効性は Gate と Funnel の施工費用に依存し、Gate の施工費用が大きくなるにつれて Funnel 設置の有効性が向上すると考えられる。Gate の施工費用は反応剤の量に大きく依存し、それは反応剤充填率と Gate の体積（施工深度、Gate の幅、Gate の厚さ）に依存する。本計算は実施工に適さないほど小さな Gate の厚さおよび反応剤充填率も計算の対象としたため、Gate の施工費用が小さく見積もられてしまい Funnel 設置 (FGS) の有効性が確認されなかったものと考えられる。なお、いずれの計算でも、最適な反応剤充填率は 2%（反応

剤と土を 2 : 98 で配合）近傍となっており、それだけの反応剤を充填させて Gate を施工すれば汚染物質を浄化できることを示唆している。しかし、この値は、実務上施工が難しいほどの小さな値となっている。このような結果に至った理由の 1 つとして、3 章で述べた汚染地下水と反応剤の接触確率を無視していることに起因する。

(6) 考察

実際の施工条件を考えれば、Gate の構造安定性確保の点から Gate の厚さは 1 m 以上、また土粒子と反応剤の均一的混合のために反応剤充填率は 20% 以上必要と考えられる²⁾が、これらの条件を無視し最適化問題を解いたところ、Gate の厚さと反応剤充填率の最適値は実施工に適さないほど小さい値となった。したがって、本計算によって得られた値 $L_{gate}^{opt} = 0.1$ m, $\phi^{opt} = 2\%$ 以上の条件で設計される FGS は、浄化性能に対して十分に安全側に設計されていると考えられる。

現場での施工条件を考慮した場合に FGS の最適設計パラメータがどのように変化するかを再検討するために、Gate の厚さを 1 m、反応剤充填率を 20% と固定させて再度計算を行った。計算条件は表-7 と同じである。その計算結果を図-24、図-25 に示す。図-24 は、汚染範囲 Plume Width = 5 m、Gate の厚さを 1 m、反応剤充填率を 20% と固定した場合における、サイトの汚染濃度による Gate の幅と Funnel の幅の最適値の変化を表わしたものである。いずれの汚染濃度においてもそれらの最適値は全く同じであった。これは、Gate の幅と Funnel の幅に与える影響が大きい要因は汚染範囲であり、汚染濃度がそれらに与える影響は小さいためである。また、最適な Funnel の幅が 13 m と Funnel 設置の有効性が確認された。最適な Gate の幅については、本計算では 0.75 m と計算されたがこの値は Gate の幅の定義域の最小の値であるため、実際には 0.75 m よりも小さい値が計算される可能性がある。図-25 は、汚染濃度 $[A]_0 = 10$ mg/L、Gate の厚さを 1 m、反応剤充填率を 20% と固定した場合における、サイトの汚染範囲による Gate の幅と Funnel の幅の最適値の変化を表わしたものである。汚染範囲が増加するにつれて、それを集水させるために必要な Funnel の幅も増加している。Gate の施工費用に関わるパラメータ（費用係数 a , c , 施工深度 D ）が著しく低い場合には、Funnel の幅を増加するよりも、Gate の幅を増加する方が有益となる場合がある。この場合においては、Funnel を設置しない工法が有効となる。

以上のことを整理すると、FGS の最適設計を行う

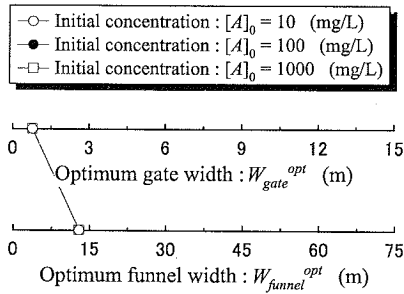


図-24 Gateの幅を1m, 反応剤充填率を20%とした場合における汚染濃度による最適値への影響

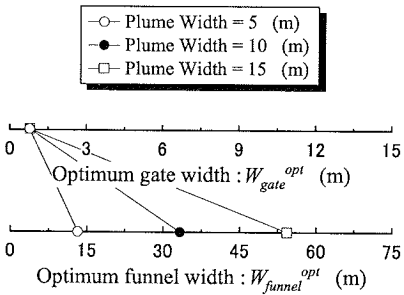


図-25 Gateの幅を1m, 反応剤充填率を20%とした場合における汚染範囲による最適値への影響

上で重要となるパラメータは, Gateの幅とFunnelの幅の2つのみとなる。つまり, 所要の集水性能をもつFGSの設計法が最適設計法につながると考えられる。なお, Gateの厚さと反応剤充填率については, その最適値は非常に小さいため, 現場の施工条件に合わせて決定すればよい。

(7) FGSの最適設計法の提案

これまでの最適化問題の計算結果から, FGSの最適設計法を提案する。FGSの最適設計法は, FGSの設計パラメータと考えられるGateの幅, Gateの厚さ, Funnelの幅, 反応剤充填率の4つの最適値を求めることを目的とするが, 前節における計算結果を考慮すれば, 4つの設計パラメータのうちGateの厚さと反応剤充填率は施工条件によって決定される可能性が高いと考えられる。そこで, Gateの厚さと反応剤充填率は入力条件と考え, 残る2つの設計パラメータであるGateの幅とFunnelの幅の最適値を求める設計法を提案することとした。

FGSを設計する上で必ず満たしなければならない条件は, 式(16)および式(17)である。それぞれの制約条件式は次のように書き換えることができる。まず, Retention Timeが式(8)で評価されることに注意

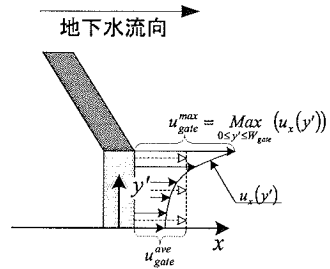


図-26 最大地下水流速と平均地下水流速の説明図

して式(16)を次のように書き換える。

$$n_{gate} \cdot \frac{L_{gate}^c}{\alpha \cdot u_{gate}^{ave}} \geq \text{Residence Time}(\phi^c) \quad (18)$$

ここに, α : Gateを通過する平均地下水流速に対する修正係数, u_{gate}^{ave} : Gateを通過する平均地下水流速(ダルシー流速), L_{gate}^c : Gateの構造安定性等の施工条件から必要とされる最小のGateの厚さ, ϕ^c : 反応剤を均一に含有させたGateを施工するために必要な最小の反応剤充填率を表わす。修正係数 α は図-26に示すように, Gateを通過する最大地下水流速とGateを通過する平均地下水流速の比を表わし, 通常 $\alpha \geq 1$ となる。修正係数の値を図-27に示す。図-27は4章で示した浸透流解析により評価され, 図-8と同じ解析平面図において $W_{gate} = 1.5 \text{ m}$, $L_{gate} = 1 \text{ m}$, $k_{gate}/k_{aquifer} = 10$, $k_{funnel}/k_{aquifer} = 1/1000$ の条件のもと W_{funnel} をパラメトリックに変化させ修正係数 α の変化を調べている。この図から, 修正係数 α の値として $\alpha = 2$ が妥当と考えられる。また, Gateの厚さ L_{gate}^c はGateを施工する機械の性能に依存すると考えられるが, あまり薄い層厚のGateを施工することは困難であることから $L_{gate}^c = 1 \text{ m}$ 程度が妥当と考えられる。反応剤充填率 ϕ^c はGateの施工方法や施工条件に依存すると考えられるが, 過去の実験等²⁾を参考にすれば, $\phi^c \geq 20\%$ 程度が妥当と考えられる。次に, 式(17)について考える。式(17)が満足することは, 図-28におけるGate部と汚染領域部において次式に示す連続式が満足することと同値である。なお, 汚染領域はFGSの設置による流況変化が及ばないほど, 遠方の位置にあるものとする。

$$W_{gate} \cdot u_{gate}^{ave} \geq \text{Plume Width} \cdot u_{aquifer} \quad (19)$$

ここに, $u_{aquifer}$: 周辺地盤を流れる地下水流速(ダルシー流速)を表わすものとする。ここで, 式(18)および式(19)から次式が導かれる。

$$\frac{W_{gate}}{\text{Plume Width}} \geq \frac{\alpha \cdot u_{aquifer} \cdot \text{Residence Time}(\phi^c)}{n_{gate} \cdot L_{gate}^c} \quad (20)$$

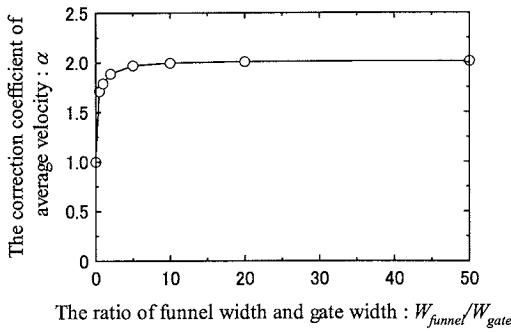


図-27 修正係数 α と FGS 幾何条件 (Funnel の幅と Gate の幅) の影響

式 (20) の左辺は、汚染範囲に対してどこまで Gate の幅を縮小できるかを表わすものである。一方、右辺はすべて地盤調査および施工条件によって決まるものであり既知量となりうる。ここで、式 (20) の右辺を次のように定義する。

$$U \equiv \frac{\alpha \cdot u_{aquifer} \cdot \text{Residence Time}(\phi^c)}{n_{gate} \cdot L_{gate}^c} \quad (21)$$

ここに、 U : 汚染調査や施工条件により決定される無次元パラメータを表わす。例えば、サイトの地盤調査を行えば、そのサイトを流れる地下水の流速 $u_{aquifer}$ が得られる。また、Gate に使用する材料が決まれば、その大きさ (粒径) から Gate の間隙率 n_{gate} を推測できる。さらに、汚染調査から汚染濃度、現場での施工条件等から反応剤を均一に含有させた Gate を施工するために必要な最小の反応剤充填率 ϕ^c 、Gate の構造安定性から必要とされる最小の Gate の厚さ L_{gate}^c が得られ、3 章に示した反応速度解析から Residence Time(ϕ^c) も計算される。

式 (20) が満足することは、FGS の設計における制約条件 (式 (16), 式 (17)) を満足することである。したがって、サイトの調査や施工条件が把握できれば、無次元パラメータ U が決定され、式 (20) から所要の性能をもつ FGS を設計するための Gate の幅に関する条件が得られる。なお、 U が 1 以上ならば $W_{gate}/\text{Plume Width}$ が 1 以上 (ちょうど図-28 の状態) であるため、Funnel を使用しない Continuous PRB 工法が有効となる。Continuous PRB 工法の設計方法については、米国の環境保護庁 (EPA) の資料²⁾ に詳述されている。流況に影響を与える Funnel を設置しないため、汚染領域の鉛直断面積と同等 ($W_{gate} = \text{Plume Width}$) の Gate を施工すればよい。

実際、地下水流速や Residence Time の値は小さいので、 U の値が 1 以下になる場合がほとんどである。 U

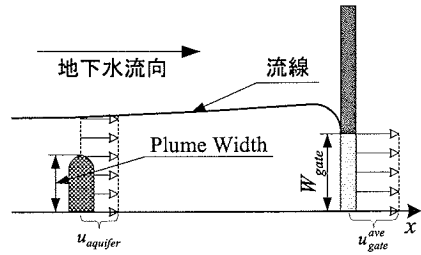


図-28 連続式の説明図

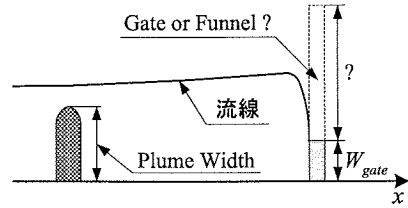


図-29 $W_{gate}/\text{Plume Width} \leq 1$ の状態

の値が 1 以下、すなわち $W_{gate}/\text{Plume Width}$ が 1 以下の状態を図-29 に示す。式 (20) により Gate の幅に関する条件が得られるので、その条件から Gate の幅および Funnel の幅を決定することになる。つまり、図-29 における破線の部分を Gate または Funnel で施工するかを判断し、各々の幅を決定することになる。

図-29 における破線の部分を Gate で施工するのか、Funnel で施工するのかの判断は、各々の単位幅あたりの施工費用から決定される。Gate の単位幅あたりの施工費用は、式 (15) に対して W_{gate} で偏微分 (テイラー展開) すれば次式のように計算される。

$$(\text{Cost index})_{GW} = aL_{gate} + c\phi^c(1 - n_{gate})L_{gate}^c D \quad (22)$$

ここに、 $(\text{Cost index})_{GW}$: Gate の単位幅あたりの施工費用を表わす。Funnel の単位幅あたりの施工費用も同様に、次式のように計算される。

$$(\text{Cost index})_{FW} = b \quad (23)$$

ここに、 $(\text{Cost index})_{FW}$: Funnel の単位幅あたりの施工費用を表わす。式 (22) および式 (23) から計算される施工費用の大小から、図-29 における破線の部分を Gate で施工するのか Funnel で施工するのかを判断する。一般に、式 (22) の右辺第 2 項目 (反応剤の費用) の値が大きくなるため、式 (23) から計算される施工費用の方が小さくなる。したがって、図-29 における破線の部分は Funnel で施工した方が有利になる。仮に、式 (22) から計算される施工費用の方が小さいならば、Funnel を設置せずに $W_{gate} = \text{Plume Width}$ となるような Gate を施工した方が有利になる (Continuous

PRB 工法)。

Funnel (FGS 工法) を使用した方が有利と判断された場合には、図-29 に示す流線を描けるような Funnel の幅を決定する必要がある。つまり、所要の Capture Width が得られるような Funnel の幅を決定する必要がある。Capture Width と Funnel の幅の関係は図-18 に示される。図-18 を図-30 のように、縦軸に $W_{gate}/\text{Capture Width}$ 、横軸に W_{funnel}/W_{gate} と再整理すると、強い相関関係が認められた。これは、 $L_{gate} = 1$ m の場合であるが、Capture Width に対する L_{gate} の依存性は図-18 からほとんどみられないため、図-30 の関係はいかなる L_{gate} においても成り立つと考えてよい。また、この回帰式は次式で与えられる。

$$\frac{W_{funnel}}{W_{gate}} = \left[a_1 \left(\frac{W_{gate}}{\text{Capture Width}} - 1 \right) + a_2 \left(\frac{W_{gate}}{\text{Capture Width}} - 1 \right)^2 + a_3 \left(\frac{W_{gate}}{\text{Capture Width}} - 1 \right)^3 \right] \cdot \frac{\text{Capture Width}}{W_{gate}} \quad (24)$$

ここに、 $a_1 = -4.2472$ 、 $a_2 = -8.4006$ 、 $a_3 = -8.2714$ である。この関係は、透水係数の最適条件である式 (11)、式 (12) を満足していれば、いかなる FGS の形状に対しても成り立つと考えてよい。また、Capture Width には式 (17) で示される制約条件式が課せられている。式 (17) を次のように変形する。

$$\frac{W_{funnel}}{\text{Plume Width}} \geq \frac{W_{gate}}{\text{Capture Width}} \cdot \frac{W_{funnel}}{W_{gate}} \quad (25)$$

式 (25) に式 (24) を代入すると、所要の性能をもつ FGS を設計するための Funnel の幅に関する条件が得られる。

$$\frac{W_{funnel}}{\text{Plume Width}} \geq a_1 \left(\frac{W_{gate}}{\text{Capture Width}} - 1 \right) + a_2 \left(\frac{W_{gate}}{\text{Capture Width}} - 1 \right)^2 + a_3 \left(\frac{W_{gate}}{\text{Capture Width}} - 1 \right)^3 \quad (26)$$

式 (20) と式 (26) を同時に満たす Gate の幅と Funnel の幅で設計すれば、所要の性能を満足した FGS が設計される。また、FGS の最小施工費用を与える最適な Gate の幅および Funnel の幅は、制約条件式の等号成立時に与えられる。このとき Capture Width = Plume Width であるから、最適な Gate の幅および Funnel の幅は式 (20)、式 (26) から次式のように決定される。

$$W_{gate}^{opt} = \text{Plume Width} \cdot U \quad (27)$$

$$W_{funnel}^{opt} = \text{Plume Width} \cdot \sum_{n=1}^3 a_n (U-1)^n \quad (28)$$

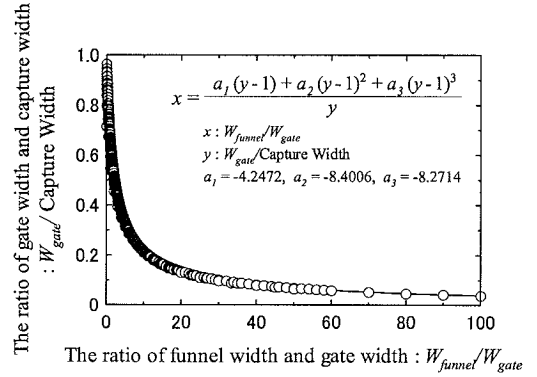


図-30 Gate の幅により無次元化された Capture Width と Funnel の幅の関係

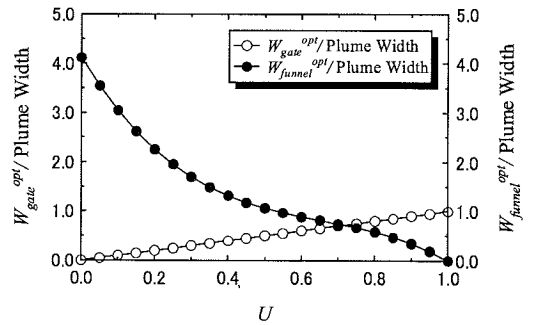


図-31 無次元パラメータ U と最適な Gate の幅 W_{gate}^{opt} 、最適な Funnel の幅 W_{funnel}^{opt} の関係

ここに、 $a_1 = -4.2472$ 、 $a_2 = -8.4006$ 、 $a_3 = -8.2714$ であり、 U は式 (21) により定義される汚染調査や施工条件によって決定される無次元パラメータである。図-31 に無次元パラメータ U と W_{gate}^{opt} 、 W_{funnel}^{opt} の関係を示す。なお、 $U = 1$ のとき、 $W_{gate}^{opt} = \text{Plume Width}$ 、 $W_{funnel}^{opt} = 0$ となり、Continuous PRB 工法の設計条件となる。本節の内容を整理し、提案した FGS の最適設計法の流れ図を図-32 に示す。

6. 結論

反応透過壁工法の最適な材料条件・形状条件（設計パラメータ）を決定するため、設計パラメータと性能の関係を浸透流解析により明らかにし、性能と汚染サイト特性の関係を反応速度解析により検討した。その結果、以下のことが結論付けられた。

- (1) 汚染地下水を反応剤（零価鉄粉）により所定の濃度まで減衰させるのに必要な時間を反応速度解析により評価した。その結果、反応剤充填率

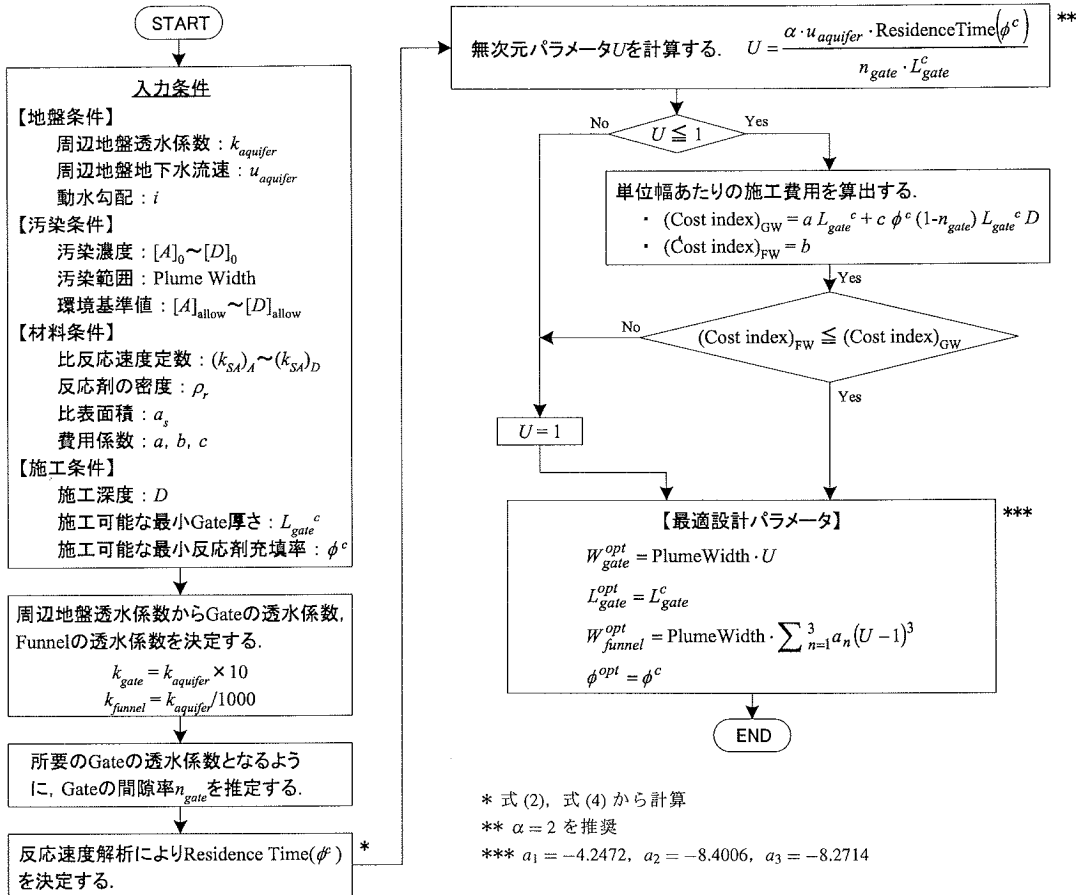


図-32 反応透過壁工法の最適設計法

が5%程度でも、実際の現場で問題となるような汚染地下水（汚染濃度1000 mg/L以下）は1日未満の短い時間で環境基準値以下まで減衰されることがわかった。したがって、反応壁内に汚染地下水を1日以上滞留させるような反応透過壁系を設計すればよいと考えられる。この条件は十分達成可能であり、例えば、反応壁の透水係数を 5.0×10^{-2} cm/s、反応壁の（有効）間隙率を0.4、反応壁内の動水勾配を1/400（図-6におけるGate内の動水勾配を参考にした）と仮定した場合、反応壁の厚さが1m程度であれば、反応壁内に汚染地下水を3.7日程度滞留させることができる。

(2) 反応壁の透水性と遮水壁の遮水性が反応透過壁の性能に与える影響を評価するために、反応壁と遮水壁の透水係数をパラメトリックに変化させて浸透流解析を行った。その結果、反応壁の透水係数が周辺地盤の10倍以上であれば、反応壁の透水係数の違いにより浄化性能や集水性に

及ぼす影響はみられなかった。また、遮水壁の透水係数が周辺地盤の1/1000倍以下であれば、遮水壁の透水係数の違いにより浄化性能や集水性に及ぼす影響はみられなかった。現場における透水係数の不均一性を考慮すると、反応壁の透水係数は周辺地盤透水係数の10倍以上、遮水壁の透水係数は周辺地盤透水係数の1/1000倍以下が適していると考えられる。

(3) 反応透過壁工法の最小施工費用を与える設計パラメータ（反応壁の幅、反応壁の厚さ、遮水壁の幅、反応剤充填率）を、最適化問題として整理した。その結果、汚染濃度1000 mg/L以下および汚染範囲15 m以下の汚染サイトに対しては、最小施工費用を与える反応壁の厚さおよび反応剤充填率の最適値は、実施工に適さないほど小さな値であった（ $L_{gate}^{opt} \leq 0.1$ m, $\phi^{opt} \leq 2\%$ ）。したがって、反応壁の厚さと反応剤充填率は反応透過壁系の性能ではなく、反応壁の構造安定性や反応剤の均一混合等を考慮して決定すべきと考えら

れる。一方、反応壁の幅と遮水壁の幅は性能に著しい影響を及ぼすので、その最適値を求めることは重要である。なお、反応壁の厚さと反応剤充填率の最適値はサイトの汚染範囲に依存しない。

- (4) 最小の施工費用を与える反応壁の幅と遮水壁の幅の最適値は、汚染調査より得られる汚染濃度 $[A]_0$ 、汚染範囲 Plume Width と、現場の地盤条件・施工条件より得られる周辺地盤地下水流速 $u_{aquifer}$ 、反応壁の間隙率 n_{gate} 、反応壁の厚さ L_{gate}^c 、反応剤充填率 ϕ^c から決定される。これらの条件から、無次元パラメータ $U = \alpha \cdot u_{aquifer} \cdot \text{Residence Time}(\phi^c) / n_{gate} \cdot L_{gate}^c$ を計算すると、反応壁の幅の最適値は $W_{gate}^{opt} = \text{Plume Width} \cdot U$ 、遮水壁の幅の最適値は $W_{funnel}^{opt} = \text{Plume Width} \cdot \sum_{n=1}^3 a_n (U - 1)^n$ として与えられる。ここに、 $a_1 = -4.2472$ 、 $a_2 = -8.4006$ 、 $a_3 = -8.2714$ である。

反応透過壁工法は、現状の土壌・地下水汚染対策に関する問題（維持管理費用高騰問題等）から期待される工法の1つであるが、設備導入までの初期費用が高いという問題点も抱えている。反応透過壁工法の性能評価や設計法に関する研究は遮水壁を設置しない Continuous PRB 工法を対象としたものが多く、遮水壁を設置する Funnel-and-Gate System 工法を対象としたものは少ない^{1),22)}。本研究で得られた知見が反応透過壁工法の適正な設計や普及のための一助となれば幸いである。

謝辞：本研究を行うにあたり、終始適切なご提言を頂きました京都大学 嘉門雅史 教授、国立環境研究所循環社会形成推進廃棄物研究センター 遠藤和人 博士に心から厚く謝意を表します。反応透過壁工法の施工情報等のご助言を頂きました熊谷組技術研究所環境修復グループ 門倉伸行 部長に深く感謝致します。

参考文献

- 1) Starr, R. C. and Cherry, J. A. : In situ remediation of contaminated ground water : the funnel-and-gate system, *Ground Water*, Vol.32(3), pp.465-476, 1994.
- 2) Powell, R. M., Blowes, D. W., Gillham, R. W., Schultz, D., Sivavec, T., Puls, R. W., Vogan, J. L., Powell, P. D. and Landis, R. : Permeable Reactive Barrier Technologies for Contaminant Remediation, EPA/600/R-98/125, September, 1998.
- 3) 地盤工学会 編：土壌・地下水汚染の調査・予測・対策, 地盤工学会, pp.82-88, 2002.
- 4) Cipollone, M. G., Wolfe, N. L. and Hassan, S. M. : Kinetic studies on the use of metallic iron to reduce organic compounds in water under environmental condition, *Am Chem Soc, Div Environ Chem*, Vol.35, pp.812-814, 1995. (Abstract)
- 5) Powell, R. M., Puls, R. W., Hightower, S. K. and Sabatini, D. A. : Coupled iron corrosion and chromate reduction : Mechanisms for subsurface remediation, *Environ. Sci. Technol.*, Vol.29, pp.1913-1922, 1995.
- 6) Cherry, J. A. and Robertson, W. D. : In situ denitrification of septic-system nitrate using reactive porous media barriers : Field trials, *Ground Water*, Vol.33(1), pp.99-111, 1995.
- 7) 副島敬道, 伊藤雅子, 今村 聡, 寺尾 宏 : 透過性浄化壁工法による硝酸性窒素汚染地下水の浄化-2, 地下水・土壌汚染とその防止対策に関する研究会集, pp.341-344, 2002.
- 8) 根岸昌範, 李 昌洙, 下村雅則, 松山明人, 今村 聡 : 鉄粉を用いた有機塩素化合物の浄化対策, 第2回環境地盤工学会シンポジウム, 地盤工学会, pp.35-40, 1999.
- 9) 先崎哲夫, 熊谷祐男 : 還元処理による有機塩素化合物の除去-鉄粉による1, 1, 2, 2-テトラクロロエタンの処理, *工業用水*, 357, pp.2-7, 1998.
- 10) 先崎哲夫, 熊谷祐男 : 還元処理による有機塩素化合物の除去(第2報)-鉄粉によるトリクロロエチレンの処理, *工業用水*, 369, pp.19-25, 1989.
- 11) 先崎哲夫 : 鉄粉によるトリクロロエチレンの処理(その2), *工業用水*, 391, pp.28-29, 1991.
- 12) Johnson, T. L., Scherer, M. M. and Tratnyek, P. G. : Kinetics of halogenated organic compound degradation by iron metal, *Environ Sci Technol*, Vol.30, pp.2634-2640, 1996.
- 13) Tratnyek, P. G., Johnson, T. L., Scherer, M. M. and Eykholt, G. R. : Remediating ground water with zero-valent metals : Chemical considerations in barrier design, *Ground Water Monitoring & Remediation*, Vol.XVII, No.4, Fall 1997.
- 14) Gavaskar, A. R., Gupta, N., Sass, B. M., Janosy, R. J. and O'Sullivan, D. : Permeable Barriers for Groundwater Remediation, Battelle Press, 1998.
- 15) 斉藤 昊 : はじめて学ぶ大学の物理化学, 科学同人, pp.77-97, 2000.
- 16) 山口柏樹 : 土質力学(講義と演習), 技報堂出版, pp.64-65, 2000.
- 17) 日野幹夫, 砂田憲吾, 太田猛彦, 渡辺邦夫 : 洪水の数値予報-その第一歩-, 森北出版, pp.47-51, 1989.
- 18) van Genuchten, M. Th. : A closed-form equation for predicting the hydraulic conductivity of unsaturated soils, *Soil Sci. Soc. Am. J.*, Vol.44, pp.892-898, 1980.
- 19) Rawls, W.J., Brakensiek, D.L., and Saxton, K.E. : Estimating soil water properties, *Transactions, ASAE*, Vol.25(5),

pp.1316-1320 and 1328, 1982.

- 20) Carsel, R.F. and Parrish, R.S. : Developing joint probability distributions of soil water retention characteristics, *Water Resour Res*, Vol.24, pp.755-769, 1988.
- 21) Frind, E. O. and Matanga, G. B. : The dual formulation of flow for contaminant transport modeling : 1. Review of theory and accuracy aspects, *Water Resour Res*, Vol.21(2),

pp.159-169, February, 1985.

- 22) Shikaze, S. : 3D numerical modeling of groundwater flow in the vicinity of funnel-and-gate systems, ARA-TR-96-5286-1, Prepared by Applied Research Associates, Inc. for U.S. Air Force, Tyndall Air Force Base, FL. April, 1996.

(2003.5.16 受付)

OPTIMUM DESIGN OF PERMEABLE REACTIVE BARRIERS FOR CONTAMINATED GROUNDWATER REMEDIATION

Hiroyuki ISHIMORI, Takeshi KATSUMI and Ryoichi FUKAGAWA

Performance of permeable reactive barriers for contaminated groundwater remediation was evaluated using FEM seepage analysis. The retention time and the capture width were calculated on the funnel-and-gate system having different geometries, in order to evaluate the effects of these geometries on the performance of funnel-and-gate system. Based on the calculated results, costs associated with the installation of funnel-and-gate system satisfying a certain performance were obtained to estimate the cost-effective geometry. Finally, optimum design flow for permeable reactive barriers was proposed.