

吸着材を含むセメント・ベントナイト系地中壁による 難分解性有機汚染物質の拡散防止に関する基礎研究

上岡 誠一¹・柏谷 衛²

¹正会員 工修 ライト工業株式会社 技術研究所 (〒2740071 千葉県船橋市習志野 4 丁目 15 番地 6 号)

²フェロー 工博 東京理科大学教授 理工学部土木工学科 (〒2780022 千葉県野田市山崎 2641)

高炉セメントとベントナイトに粉末活性炭を混合して硬化させた地中壁(粉末活性炭混合 CB 地中壁)で、難分解性有機汚染物質を遮蔽する手法の検討を行った。指標有機汚染物質として、分子量の選別が可能なジエチレングリコールおよびポリエチレングリコールを使用した。粉末活性炭混合 CB の有機汚染物質に対する遮蔽能力の解明を、吸着物質の移動を解析するモデルに、移流拡散方程式を適用して実施した。そして、有効拡散係数、遅延係数および間隙内平均流速等の実測結果を用いることで、有機汚染物質の破過時間を予測した。この結果、厚さ 1m の地中壁を構築し、動水勾配が 0.1 を示すとき、分子量 200 から 1000 の有機物質は 100 年以上、分子量 100 でも 40 年以上の遮蔽能力が算出された。

Key Words : PAC mixed CB cut-off barrier , index of organic contaminant, Pe-number, T_b-number, breakthrough-time

1. はじめに

廃棄物埋立地など、汚染源の地下水汚染域制御のために、実用的な見地から地中壁を構築して地下水中に汚染物質が拡散するのを防ぐには二つの方法が挙げられる。第 1 の方法は地中壁の透水係数を 10^{-7} cm/sec オーダー以下に保つことによって、汚染物質の移動媒体である地下水の通過を遮断することであり、第 2 の方法は、汚染した地下水が地中壁を透過した際に、地中壁内部に汚染物質を抑制させることである。

筆者らは、高炉セメントなどのセメント系固化材と、膨潤性を有し、膨潤後には疎水性を示すベントナイトの混合材(以下 CB という)を地中壁として用い、土壌・地下水中に含まれる重金属類の拡散を防止する基礎研究を行ってきた^{2),3),4),5)}。これらの研究で Cr⁶⁺を除く重金属類の、CB 地中壁内部で水酸化物等の不溶性物質の形成による抑制および吸着現象を解明してきた。

本研究は、難分解性有機汚染物質に対する CB 地中壁の設置による拡散防止の解明を試みたものである。廃棄物埋立地に起因した地下水汚染などでは、多種類の有機汚染物質の検出結果が報告されているため⁶⁾、多岐にわたる有機汚染物質を扱うことが困

難であることから、それらの分子量に着目し、分子量別の難分解性有機汚染物質に対する CB 地中壁の拡散防止効果を解明するための基礎研究を行った。この研究では、CB 地中壁内部に侵入した難分解性有機汚染物質を壁内に抑制させる手段として、CB に吸着材として粉末活性炭を混合した材料(以下、粉末活性炭 CB という)を使用した。セメント系固化材としては、化学抵抗性に優れ、長期強度の発現が認められる高炉セメント B 種を、ベントナイトには膨潤度の高い Na 型ベントナイトを使用した。これらの材料を使用して作製した粉末活性炭混合 CB 供試体の材令 7 日目における透水係数は約 1×10^{-5} cm/sec であった。

有機汚染物質の多くは、生物分解によってその濃度が時間とともに低下していく。しかし、本研究では物質収支の面から、それらの汚染物質が地中壁内部で長時間保存されていることが必要であり、適応する難分解性有機物質としてジエチレングリコール(以下、DEG という)と分子量の異なる 4 種類のポリエチレングリコール(以下、PEG という)を、難分解であることを室内実験で確認したうえ、指標有機汚染物質として使用した。

粉末活性炭混合 CB 地中壁の有機汚染物質に対する遮蔽能力の解明には、テーリング現象(地中壁を

透過した浸出水中の汚染物質濃度が初期濃度に収束していく現象)を示す吸着物質移動を解析するモデルとして、一次元の非定常移流拡散方程式を適用した。そして、有効拡散係数、遅延係数および間隙内平均流速等の供試体による実測、有機汚染物質の破過時間を予測した。これより、5種類の指標有機汚染物質に対する粉末活性炭混合CB地中壁の適用の可能性を評価した。

2. 模擬汚染水の調製、試料分析および供試体の作製

(1) 模擬汚染水の調製

DEG, PEG はともに水溶性であり、常温において安定した性質を示す。実験に使用した DEG, PEG のおおよその分子量は、DEG で 100, PEG で 200, 400, 600 および 1000 の 5 種類である (DEG, PEG の種類を表すのに分子量の前に#を付けた。以下、例として PEG の分子量 200 は PEG#200 とする)。

室内透水試験に使用した模擬汚染水に含まれる有機汚染物質濃度は、全有機炭素濃度 (以下、TOC とする) を 10mg/L として調製した。室内透水試験を行っていくと、有機汚染物質は長期 (最長 30 日間) に渡り供試体内部に蓄積されるため、好気性微生物による分解性の可否を調査する実験を行った。この実験では、TOC 濃度約 10mg/L 溶液 3L をビーカーに入れ、活性汚泥処理水を適量注ぎ、pH7.0 で溶存酸素を十分に保持した状態で 30 日間に渡り、混合・滞留させた。経日的に上澄み水の TOC 濃度の測定を行った。この結果、図-1 に示したように、上澄み水の TOC 濃度に大きな変化は認められなかった。これより、DEG, PEG は難分解性物質と判断し、模擬汚染水用指標有機汚染物質として使用することとした。

(2) TOC 濃度の測定

模擬汚染水およびこの実験から得られた試料中の TOC 濃度の測定には、燃焼酸化-赤外線式 TOC 分析計を用いた。採取した直後の試料、または濃度測定が直ちに行えず、採取した直後に冷所に保存しておいた試料は、前処理として、測定直前に塩酸を少量加えて pH3 以下に調製し、炭酸塩をすべて遊離の無機性炭素(CO₂)とした後、窒素ガスを用いて曝気し、試料中から無機性炭素を除去する操作を行った。

(3) 粉末活性炭の物性

吸着材として使用した粉末活性炭の物性を表-1に

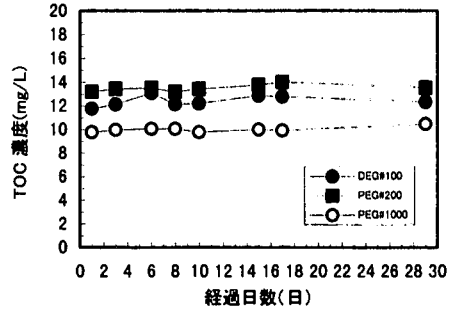


図-1 DEG, PEG の生物分解性試験

表-1 実験に使用した粉末活性炭の物性

比表面積 <BET>(m ² /g)	10<細孔容積>7500Å (mL/g)	平均細孔径 (Å)	嵩比重
800~1000	1.653	41~33	0.20~0.23

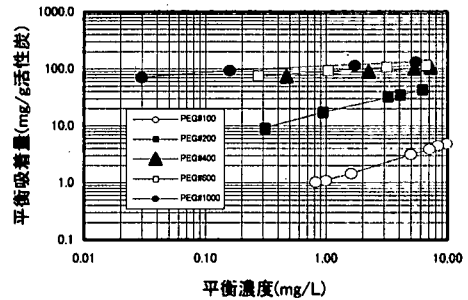


図-2 粉末活性炭の吸着等温線

示す⁸⁾。さらに、DEG, PEG に対する吸着能力を調査するために、各分子量別に吸着等温試験を行った。図-2 は、Freundlich 型吸着等温式で示したものである。同図より、分子量が高くなるに従い、平衡吸着量も大きくなることが確認された。

(4) 供試体の作製方法

粉末活性炭混合 CB 供試体の配合は、高炉セメント B 種:250kg, Na 型ベントナイト:90kg, 粉末活性炭:5 または 10kg および水道水:1000kg とした (以下、粉末活性炭 5kg の添加を Case1, 同 10kg の添加を Case2 という)。これらの配合は、CB 地中壁を構築する際に掘削土壌壁面の崩落を防止するために使用されるベントナイト安定液の管理基準値として示されるファンネル粘度 (500mL/500mL) が 36 秒以下になることを考慮して定めた。

実験に使用した供試体の作製では、容器に水道水、次に Na 型ベントナイト、さらに、高炉セメント B

種、最後に粉末活性炭を添加した。各材料の添加の間に3分間の攪拌時間をとった。この操作手順は、Na型ベントナイトが十分に膨潤していない場合、高炉セメントを混入することによって生じるCaイオンとNaイオンが置換して、膨潤性の低いCa型ベントナイトへの変質を防止することにあつた。攪拌を終えた粉末活性炭混合CBのスラリーは、直径50mm、長さ500mmのポリエチレン・フィルム製グラウト袋に移し、十分に脱気した後、水温20℃で7日間の養生を行った。養生後に成型して供試体とした。

(5) 供試体内部での粉末活性炭の吸着能力

粉末活性炭はCBと練り混ぜることによって、本来有している吸着能力を損なう可能性がある。そこで、養生終了直後の粉末活性炭混合CB成型物を粉碎して吸着等温試験を行った。その結果を図-3に示す。

図-3の①は、粉末活性炭混合CB (Case1) に対する Freundlich 型吸着等温線を両対数目盛で示したものである。図-2で示した粉末活性炭に対する吸着能力と比較すると、平衡吸着量に約2オーダーの差が認められる。しかし、過去の調査結果から DEG、PEGはともにCBに全く吸着されないことが判明しているため、Case1の配合をもとに粉末活性炭のみの吸着量に換算すると図-3で①は②へと移行する。そして、図-3の②と図-2を分配係数によって比較した結果が表-2である。この兩者について、大きな差が認められないため、粉末活性炭をCBと練り混ぜることによる吸着能力の減少はないと判断した。

3. 有機汚染物質遮蔽能力評価方法

(1) 移流拡散方程式

地中壁を透過した有機汚染物質濃度が示すテーリング現象に対する吸着性物質移動を解析するため、式(1)に示す次元非定常移流拡散方程式を使用する⁹⁾。

$$\theta R \frac{\partial C}{\partial t} + q \frac{\partial C}{\partial z} - \theta D \frac{\partial^2 C}{\partial z^2} = 0 \quad (1)$$

ここで、C: 地中壁中での有機汚染物質濃度(mg/L)

z: 地中壁の表面からの移動距離(cm)

t: 移動時間(sec)

θ : 間隙率(-)

R: 遅延係数(-)

D: 有効拡散係数(cm²/sec)

q: ダルシーの移動速度(cm/sec)

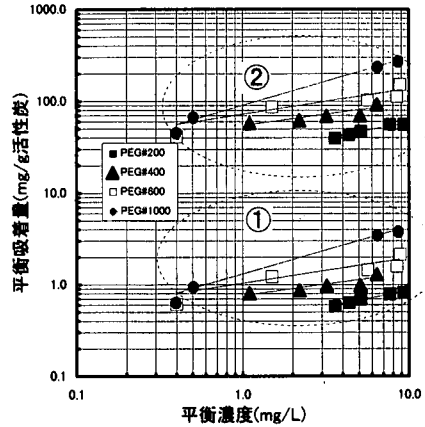


図-3 粉末活性炭混合CBの吸着等温線

表-2 粉末活性炭と粉末活性炭混合CBの分配係数比較

指標有機汚染物質		分配係数	
		粉末活性炭(図-2)	粉末活性炭混合CB(図-3②)
DEG	#200	17.3	19.1
	#400	81.3	77.6
PEG	#600	90.2	89.1
	#1000	111.2	147.9

さらに、地中壁内部における直線的な水の速度、間隙内平均流速 (V) は、式(2)で示される。

$$V = \frac{q}{\theta} \quad (2)$$

粉末活性炭混合CB地中壁によって遮蔽された有機汚染地下水は一定濃度であると仮定し、室内透水試験でも、モールド内にセットされた供試体の入口からの距離 $z=0$ (すなわち入口部) での濃度を、いずれの時間 (t) でも一定値 C_0 とした。地中壁が無限の長さを有していると仮定 (非定常拡散) すると、初期条件、境界条件は式(3)から式(5)で表される。

$$C(0, t) = C_0 \quad (3)$$

$$\frac{\partial C}{\partial z}(\infty, t) = 0 \quad (4)$$

$$C(z, 0) = 0 \quad (5)$$

式(1)を式(3)から式(5)で示した初期条件および境界条件によって解くとその解は式(6)で表される。

$$\frac{C}{C_0} = \frac{1}{2} \left[\operatorname{erfc} \left(\frac{Rz - Vt}{2\sqrt{DRt}} \right) + \exp \left(\frac{Vz}{D} \right) * \operatorname{erfc} \left(\frac{Rz + Vt}{2\sqrt{DRt}} \right) \right] \quad (6)$$

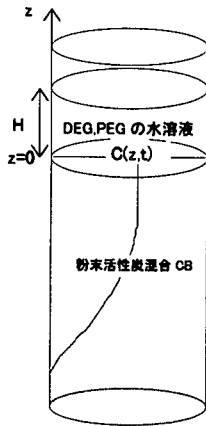


図-4 有効拡散係数の算出

ここで、erfc は補誤差関数である。式(6)によって、供試体の距離 (z) と時間 (t) の関数として有機汚染物質の相対濃度 (C/Co) が与えられる。式(6)から種々の時間 (t) に対する解を求める場合、任意時間に対する相対濃度の関係を導く必要がある。ここでは、簡素化するために、式(1)をペクレ数 (Pe) と無次元時間数 (Td) によって表現した。Pe は移流と分散の相対的な影響の割合を示している¹⁰⁾。

$$Pe = \frac{Vz}{D} \quad (7)$$

$$Td = \frac{Dt}{Rz^2} \quad (8)$$

上記式(6), (7), (8)を用いて、粉末活性炭混合 CB 供試体の有機汚染物質に対する遮蔽能力を評価するために、有効拡散係数、遅延係数および間隙内平均流速を求める。

(2)有効拡散係数の算出

a) 実験方法

粉末活性炭混合 CB 供試体の有効拡散係数を求めるために、まず、図-4 に示した直径 50mm のアクリル製円筒内に直径 50mm、長さ 130mm の供試体を挿入した。その上部に TOC 濃度 1000mg/L の 5 種類の模擬汚染水 (DEG または PEG の水溶液) 50mL をそれぞれの円筒内に静かに注いでおき、その後、経時的に 0.2mL の試料を H/2 の位置で採取した。供試体を挿入したアクリル製円筒は、温度 20℃ で静置させておき、採取試料の TOC 濃度を測定してその濃度変化を調べた。実験中にアクリル製円筒と供試体の側面に隙間が生じて、模擬汚染水が侵入してくることを防止するため、あらかじめ、供試体側面に

シリコングリースを塗布した。試料採取の際に微小の水流を生じ拡散に影響する等を考慮し、また、算出する有効拡散係数の信頼性の面から同じ供試体に対し 5 回の試験を行った。そして、変動係数が 10% 以下を示す算出値の平均値を有効拡散係数とした。

b) 算出方法

粉末活性炭混合 CB 供試体の上部に注ぎ入れた初期濃度 Co の模擬汚染水について、汚染物質が拡散輸送されていく任意深さ(z)、任意時間(t)における汚染物質の濃度は、式(9)で示す基礎式と、式(10), (11), (12)および(13)の初期、境界条件により、式(14)で示すことができる。ここで、erf は式(15)で示される誤差関数である¹¹⁾。

$$\frac{\partial C}{\partial t} = -\frac{1}{\theta} \frac{\partial}{\partial z} \left(D \frac{\partial C}{\partial z} \right) \quad (9)$$

$$C(z, 0) = C_0 \quad (10)$$

$$C(z, t) = Cu(t) \quad (z \geq 0) \quad (11)$$

$$C(-\infty, t) = 0 \quad (12)$$

$$V \frac{\partial Cu}{\partial t} = -SD \frac{\partial C}{\partial z} \Big|_{z=0} \quad (13)$$

$$\frac{C(z, t)}{C_0} = \exp(T) \operatorname{erf}(\sqrt{T}) \quad (14)$$

$$\operatorname{erf}(x) = \frac{2}{\sqrt{\pi}} \int_0^x e^{-\mu^2} d\mu \quad (15)$$

ここで、Cu(t): 模擬汚染水濃度(mg/L)

V: 模擬汚染水容積(cm³)

S: 供試体上面の面積(cm²)

θ: 供試体の間隙率(-)

図-4 に示した模擬汚染水 (DEG または PEG の水溶液) 濃度 Cu(t) を経時的に測定し、その測定値を式(14)に当てはめ、無次元時間 T を得る。さらに、式(16)に無次元時間 T を代入し有効拡散係数 D が算出される。

$$T = D \theta S^2 t / V^2 \quad (16)$$

この有効拡散係数 D の算出方法は、式(12)に示される通り、供試体を半無限長として扱っているため、模擬汚染物質が供試体最下面に達していないときの模擬汚染水濃度を実測する必要がある。このため、実験終了時に供試体最下面から 3cm の位置にある試料について吸着等温試験を行い、Freundlich 型吸着等温式を算出することで試料の吸着能力が低下していないことを確認する。この結果から、供試体最下

面に模擬汚染物質が達していないと判断できる。

c) 算出結果

粉末活性炭混合 CB (供試体の Case1 および Case2) に対する 5 種類の模擬汚染物質の有効拡散係数 (D) 算出結果を図-5 に示す。

Case1 および Case2 に対し、有効拡散係数はすべて $10^{-7} \text{ cm}^2/\text{sec}$ オーダーを示しており、粉末活性炭添加量の多い Case2 が Case1 よりも大きな値を示すことも確認された。さらに、分子量別に比較を行うと、分子量中位の PEG#400 が最小値を示しており、#200 から #100 になるほど、また、#600 から #1000 になるほど有効拡散係数は大きな値を示すことが認められた。

図-2 に示した粉末活性炭の吸着等温線より、DEG#100 は吸着性能が低く、分子量が増加するに従い吸着性能が高くなることが確認されている。また、多孔性媒体に対する非吸着性物質の拡散現象は、連続した間隙径が大きいほど、有効拡散係数が大きくなることが知られている¹¹⁾。これは、媒体と非吸着性物質の衝突確率が低く、拡散方向のフラックスが損失されないためと考えられ、逆に間隙径が等しい場合、非吸着性物質の粒径が小さくなるに従い有効拡散係数は大きくなると考えられる。

以上のことから、PEG#600 および #1000 は、供試体内に拡散され、次に吸着作用を受け、常に大きな濃度勾配が保たれることで、有効拡散係数は PEG#600 より #1000 の方が大きくなったと推察される。他方、DEG#100 および PEG#200 は、粉末活性炭に対する吸着性は低いが、一分子の粒径が小さいため、有効拡散係数が大きな値を示したものと推察される。

(3) 遅延係数の算出

a) 実験方法

遅延係数を求めるために図-6 に示す室内透水試験装置を用いた。この装置は、一度に最大 5 本の供試体を同一条件下で透水試験することができる。使用した供試体は直径 50mm、長さ 100mm で成形し、あらかじめ 20°C の恒温水槽内で 7 日間の養生を行い、ゴムスリーブで包んだうえ、透水試験用モールド内に固定し、恒温水槽に設置した。無機性炭素の混入を防止するため窒素ボンベで加圧した透水圧を用い、側圧はコンプレッサーによって加圧した。透水圧は 0.5 kgf/cm^2 (0.049 MPa)、側圧は 1.0 kgf/cm^2 (0.098 MPa) とした。

この室内透水試験では、2, (1) で示した模擬汚染水を用いた。模擬汚染水は供試体に 28 日間透水させた。これと共に、非吸着性物質として塩化リチウムを Li

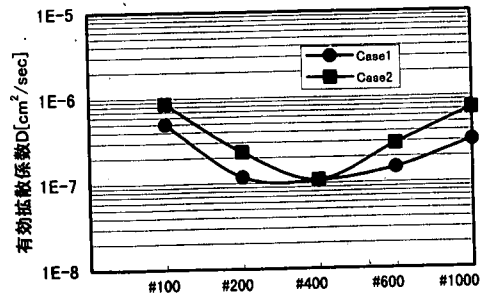


図-5 分子量別の有効拡散係数の実験結果

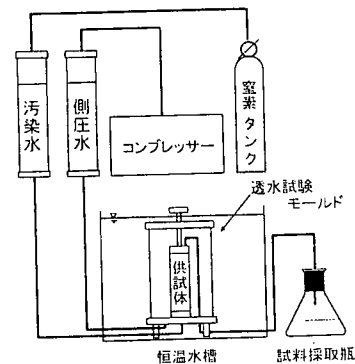


図-6 室内透水試験装置

として 10 mg/L となるよう蒸留水で調整した溶液を用いて、同様の透水試験を行った。Li は Cl, K, Na と共に非吸着性物質としての性能を有していることが知られてきたが、セメント硬化体に対する拡散係数は Li が最も小さい¹²⁾。しかし、Cl は $\text{CaA} (3\text{CaO} \cdot \text{Al}_2\text{O}_3)$ セメント水和物と反応性があること、さらに、K, Na は Na 型ペントナイトから溶出する可能性があることから、Li を非吸着性物質として選択した。吸着等温試験により、Li は粉末活性炭混合 CB に対してほとんど吸着性が認められないことをあらかじめ確認した。

供試体からの浸出液は試料採取瓶に採取して、その容積と pH を測定した後、TOC または Li 濃度の分析を行った。

b) 算出方法

供試体内の間隙は、物質輸送に関係する有効間隙と、物質輸送に関係しないセメント水和物が進行して生じる閉塞間隙に分けられる。室内透水試験時に、有効間隙を飽和した水と非吸着性物質を含む透水液が完全に置換されたとき、浸出液中の非吸着性物質濃度 (C) と透水液初期濃度 (C_0) との相対濃度 (C/C_0) は 0.5 を示すと仮定した¹³⁾。テーリング現

象を生じる吸着性物質を透水した場合、相対濃度が 0.5 に達するまでに浸出した液量は、非吸着性物質を透水したときの浸出液量 (=有効間隙量) に比べて多くなる。このとき、有効間隙量と相対濃度が 0.5 を示す吸着性物質の浸出液量の比を遅延係数として求め、相対濃度に関係なく、有効間隙量と累加浸出液量の比を累積間隙体積とした。

c) 算出結果

図-7 および図-8 は、供試体 (Case1, Case2) に模擬汚染水および Li 溶液を透水したときの累積間隙体積と TOC による相対濃度 (C/Co) の関係を示している。

Case1, Case2 ともに浸出液量が約 90mL で C/Co が 0.5 を示す Li の破過が確認された。この浸出液量は、使用した供試体 (φ 50mm×100mm) 内の有効間隙量を意味するため、Case1 と Case2 は有効間隙量には大きな差がなかったといえる。また、Case1, Case2 ともに指標有機汚染物質の破過が、分子量#100, 200, 1000, 600, 400 の順で確認された (#400 と #600 とは近少差)。これは、概ね、分子量の異なる各指標有機汚染物質に対する有効拡散係数と同様の傾向を示したといえる。透水係数が約 1×10^{-5} cm/sec を示す Case1 と Case2 の供試体内では、水温 20℃ で水は層流状態の流れであると考えられることと、吸着等温試験で 120rpm 以上の攪拌速度を用いても、粉末活性炭は吸着量に変化を生じなかったことから、供試体内部での拡散は乱されることがなかったと考えられる。

Case1 と Case2 では、累積間隙体積に対する相対濃度変化に違いが認められた。つまり、累積浸出液量が増加するに従い、浸出液中の TOC 濃度は初期濃度に収束する現象が認められた。しかし、Case1 では相対濃度変化が累積間隙体積の増加に伴い急激に変化しているのに対し、Case2 では緩やかに変化していた。すなわち、粉末活性炭含有量を増加させると破過した後に高濃度の有機物質の急激な浸出を防止し、有機物質の浸出を遅延させる効果があったといえる。表-3 に、遅延係数の算出結果を示す。

遅延係数は、C/Co が 0.5 を示す破過が確認された時点での非吸着性物質 (Li) と吸着性物質 (この場合には DEG または PEG) の累積浸出液量比 (累積間隙体積) で示される。

粉末活性炭混合 CB の遅延係数は、#400 および #600 付近で最大値を示すことが確認された。また、Case1 に対し、Case2 は、最低でも 2.4 倍、最大で 10.7 倍の遅延係数を示した。

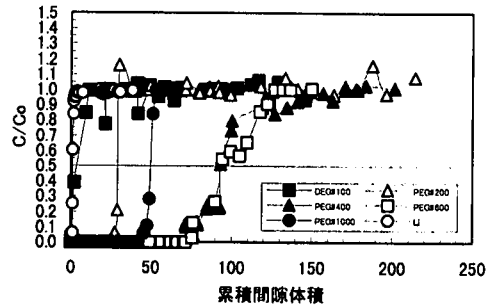


図-7 Case1 の累積間隙体積に対する相対濃度変化

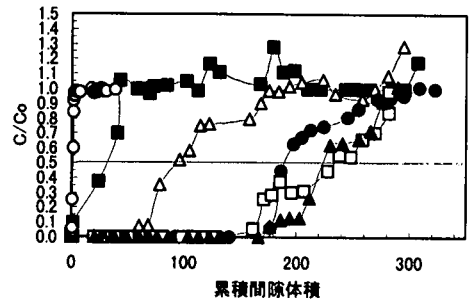


図-8 Case2 の累積間隙体積に対する相対濃度変化

表-3 Case1, Case2 に対する指標有機汚染物質の遅延係数

Case	遅延係数(R)					
	非吸着性物質	吸着性物質				
	Li	DEG	PEG			
	—	#100	#200	#400	#600	#1000
1	1	3	29	94	93	50
2	1	32	94	223	233	189

(4) 間隙内平均流速の算出

式(2)で示される間隙内平均流速 (V) を算出するために必要な供試体の間隙率 (θ) は、前節(3)で述べたように非吸着性物質である Li が C/Co が 0.5 を示したときの累積浸出液量をもとに 0.46 と算出した。

表-4 は、Case1 および Case2 の若材令における平均透水係数を 1×10^{-5} cm/sec とし、粉末活性炭混合 CB 地中壁によって有機汚染地下水を隔離した場合の動水勾配を 0.05, 0.10, 0.15 と仮定して間隙内平均流速 (V) を求めた結果である。動水勾配は粉末活性炭混合 CB を打設した場合に約 10% のフリーゾング水が隔離汚染域に逸水することと、地中壁による汚染地下水隔離の施工事例から仮定した値である。

表-4 間隙内平均流速の算定

Case	間隙率 (-)	動水勾配 (-)	間隙内平均流速 (m/year)
1, 2	0.46	0.05	0.344
		0.10	0.687
		0.15	1.031

(5)破過時間の算出予測

粉末活性炭混合 CB 地中壁を有機汚染物質によって汚染された地下水の遮蔽材料として用いたときの遮蔽能力の解明を行うこととした。式(6), (7)および式(8)に供試体での実測による有効拡散係数と、遅延係数の算出結果および間隙内平均流速の推定結果を適用し、これより、破過時間を予測することとした。間隙内平均流速は、上記のように平均透水係数を 1×10^{-5} cm/sec とし、地下水の遮蔽によって生じる動水勾配を 0.1 として算出した値を用いた。

まず、式(6), (7)および式(8)を整理して、 C_0 の 1/100 の濃度が浸出液中に検出されたときを破過とみなし、このときの Pe と T_D の関係を示すと図-9の通りとなる。この図より、式(7)から算定した Pe に対応する T_D を求め、さらに、式(8)から破過時間 (t) を算出する。図-10は、任意の地中壁厚 (z) に対する模擬汚染水の破過時間の予測値を示している。

以上の結果から、Case2 の地中壁厚を 1.0m としたとき、分子量 200 以上の有機汚染物質は 100 年間に渡って遮蔽できると予測された。また、分子量 100 の有機汚染物質は、約 40 年間の遮蔽能力があると予測された。したがって、分子量 100 程度の難分解性有機汚染物質を対象とする場合、地中壁を 1.0m より厚くする必要がある。

4. 考察

指標有機汚染物質に対する粉末活性炭混合 CB 地中壁の破過時間を予測するために、移流拡散方程式を適用し、有効拡散係数、遅延係数、間隙内平均流速を求めることを検討した。これらの適用に当たっては、それぞれの要素の妥当性をも検討しておく必要がある。そこで、前節(3)に示した室内透水試験結果(図-7, 図-8)による破過時間実測値と、これらの室内透水試験と同一条件での破過時間を予測して、表-5に示した。

破過時間は Case1 では実験値と計算値とは差がほぼ 10%以内に入っており、概ね、計算結果は正しい値で予測できたといえる。Case2 においても PEG#600 以外は、概ね、正しく予測できている。

実験値と計算値の間に差が生じた理由は、粉末活性炭

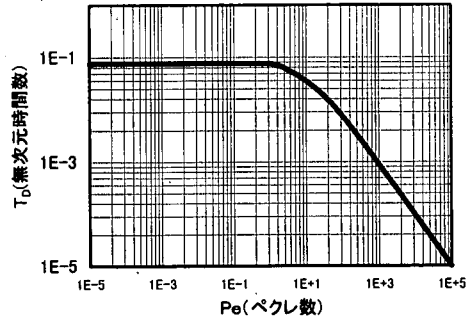


図-9 $C=C_0/100$ の時の T_D と Pe の関係

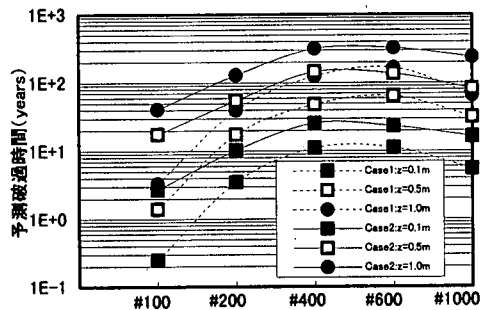


図-10 地中壁厚に対する破過時間の関係

表-5 破過時間の室内透水試験による実験値と計算値の比較

指標有機 汚染物質 の種類		破過時間(Days)			
		Case1		Case2	
		実験値	計算値	実験値	計算値
DEG	#100	0.3	0.5	2.7	3.0
	#200	2.2	2.8	7.9	9.4
	#400	9.4	10.1	22.7	23.6
PEG	#600	10.4	10.1	15.7	23.6
	#1000	5.4	5.0	15.7	18.0

混合 CB 供試体は若材令であるため、透水試験期間中も、徐々に、セメント硬化が進行している。特に、遅延係数の算出を行った室内透水試験では、初期の浸出液に相当に高濃度の Ca イオンが検出されたことから、初期の透水係数に差を生じ、これがセメント水和反応に影響を及ぼしたと推察される。破過時間の計算に用いた透水係数は、実験期間 (28 日間) の平均的な値を用いた。実験初期に分子量の違いによって、透水係数に差が生じており、この差は、分子の細孔への目詰まりなどが要因となっていると考えられる。Case1 に対し、Case2 の予測値と実測値の差が大きいのは、活性炭含有量が多く、平均的な透水係数はほぼ等しいが、実験初期の透水係数はやや大きいためと推察している。

5. まとめ

本研究では、高炉セメント B 種、Na 型ベントナイトに異なる量の粉末活性炭を混合した地中壁の有機物質の遮蔽能力を室内透水試験を併用して評価した。指標有機汚染物質としては、難生物分解性であることを確認して、分子量約 100 の DEG、分子量約 200, 400, 600, 1000 の PEG を選定した。得られた結果を以下に示す。

- (1) 指標有機汚染物質を用いた実験で、粉末活性炭は CB と混合した場合においても吸着能力がほとんど低下しないことが確認された。粉末活性炭混合 CB 地中壁は、透水性が低く、かつ、有機汚染物質に対する吸着性に優れた遮蔽材料となりうる。
- (2) 粉末活性炭混合 CB 供試体に対する指標有機汚染物質の有効拡散係数は、有機分子量 100~1000 の範囲で 10^{-7} cm²/sec オーダーを示した。この中で、分子量 400 が最も低い有効拡散係数を示した。
- (3) 粉末活性炭混合 CB 供試体の遅延係数は、非吸着性物質を対照として算出したところ、Case1 で 3~94、Case2 で 32~233 であり、Case2 は Case1 の 2.4~10.7 倍に増加することが確認された。
- (4) 粉末活性炭混合 CB 供試体の若材令における透水係数、動水勾配および地中壁厚をそれぞれ、 1×10^{-5} cm/sec、0.1m および 1m として、一次元移流拡散方程式により破過時間の計算を行ったところ、Case2 では PEG#200 以上で 100 年以上の遮蔽が可能であり、DEG#100 では約 40 年の遮蔽能力があると予測された。このことから、分子量 100 程度の難分解性物質を対象とする場合には、地中壁を 1.0m よりも厚くする必要がある。
- (5) 有効拡散係数、遅延係数および間隙内平均流速の適合性を検討し、移流拡散方程式から求めた破過時間の計算値の信頼性を確認するため、室内透水試験による破過時間の実験値と比較した。この結果、Case1 での破過時間は実験値と計算値が概ね一致した。Case2 でも PEG#600 以外は概ね正しく予測できた。

参考文献

- 1) Jefferis, S.A.: In-ground barriers, in Contaminated Land-Problems and Solutions, Blackie&Professional, pp. 111-140, 1993.
- 2) 柏谷 衛, 上岡 誠一, 出口 浩, 岩佐 弘: クロム系廃棄物から流出する 6 価クロム化合物のセメント・ベントナイト系地中壁を用いた地下水汚染防止に関する実験的研究, 廃棄物学会論文誌別冊, Vol. 8, No. 2, pp. 97-106, 1997.
- 3) Kashiwaya, M. et al.: Laboratory Study on Dispersion Prevention of Dissolved Sexivalent Chromium in Groundwater by Cement-Bentonite Cut-off Barriers, Wat. Sci. Tec, Vol. 34, No. 7-8, pp. 375-382, 1996.
- 4) 柏谷 衛, 出口 浩, 岡野 友則, 岩佐 弘, 飯尾 正俊: セメント・ベントナイト系多孔質硬化物による重金属流出防止に関する研究 (その 1, カドミウムおよび亜鉛系汚染水による透水試験), 第 3 回廃棄物学会研究発表会講演論文集, pp. 579-582, 1992.
- 5) 出口 浩, 柏谷 衛, 岡野 友則, 岩佐 弘, 飯尾 正俊: セメント・ベントナイト系多孔質硬化物による有害物質滞留とそのミクロ的視点からの検討, 第 2 回地下水・土壌汚染とその防止対策に関する研究会講演集, pp. 204-209, 1992.
- 6) 池口 孝: 廃棄物の埋立処分に係わる地下水汚染問題とその対応, 地下水学会誌, 第 39 巻, 第 3 号, pp. 187-199, 1997
- 7) 藤本 武彦: 新界面活性剤入門, 三洋化成工業株式会社, pp. 94-100, 1981.
- 8) 活性炭工業, 重化学工業通信社, pp. 253-257, 1992
- 9) 棚橋 隆彦: はじめての CFD-移流拡散方程式-, コロナ社, pp. 11-33, 1996.
- 10) 平岡 正勝, 田中 幹也: 移動現象論, 朝倉書店, pp. 111-114, 1994.
- 11) 寺島 泰, 熊木 徹: 数種多孔性材料中における水分子の有効拡散係数, 土木学会論文報告集第 256 号, 91-94, 1976.
- 12) 後藤 誠史, 茂 啓二郎, 高木 達雄, 大門 正樹: セメント硬化体の細孔径分布とイオンの拡散, セメント技術年報 36, セメント協会, pp. 49-52, 1982.
- 13) 福江 正治, 加藤 義久, 小松田 精吉: 地盤と地下水汚染の原理, 東海大学出版会, pp. 204, 1995.

(1997.12.24 受付)

STUDY ON THE DIFFUSION PREVENTION OF NON-BIODEGRADABLE ORGANIC CONTAMINANTS IN GROUNDWATER BY INSTALLING POWDERED ACTIVATED CARBON MIXED CEMENT-BENTONITE CUT - OFF BARRIERS

Seiichi UEOKA and Mamoru KASHIWAYA

A study was conducted to investigate the diffusion prevention procedure of non-biodegradable organic contaminants in groundwater by installing powdered activated carbon mixed CB cut-off barriers. Diethylene and polyethylene glycols were applied as the indicating contaminants. An estimation on the diffusion prevention ability was carried out applying advective diffusion equation . As the results, the reaching periods to breakthrough for 100 years or longer were estimated on the contaminants having approx. 200 to 1000 of molecular weights and for 40 years or longer was also estimated on the contaminants having approx. 100 , when assuming both 1.0m in thickness of the cut-off barriers constructed and maintaining 0.1 of the hydraulic gradient .