

1-8 建設事業における地盤汚染の挙動予測・影響評価・制御技術の開発

研究予算：運営費交付金（治水、道路整備勘定）

研究期間：平 14～平 17

担当チーム：材料地盤研究グループ（土質）

研究担当者：小橋秀俊、古本一司、森啓年

【要旨】

建設工事において、重金属等によって汚染された土壌、地下水に遭遇する場合がある。このような場合、浄化など恒久的な対策を実施することが望ましいが、安全かつ経済的な対策が存在しないのが現状であり、汚染の拡散を防止し安全に工事を進めることが可能となる技術の確立が求められている。

本研究では、建設工事において遭遇する地盤汚染（土壌・地下水汚染）に関し、調査技術、移流分散解析等を用いた影響予測技術、汚染拡散防止技術およびモニタリング技術について検討を行い、これらを元に地盤汚染制御技術の提案を行った。

その成果については、「建設工事において遭遇する地盤汚染マニュアル（暫定版）」としてとりまとめるとともに、影響予測の入力条件である溶出、吸着、分散特性の決定法の検証を行い、今後の技術的課題を明らかにした。

キーワード：土壌・地下水汚染、調査、影響予測、対策、モニタリング

1. はじめに

平成 15 年 2 月より土壌汚染対策法が施行されている。同法では有害物質を使用していた事業所の跡地や汚染の疑いがある土地に対して、都道府県知事が有害物質の含有量や溶出量の基準をもとに区域を指定し、指定区域においては汚染防止措置などを実施することとなった。さらに、その状況は台帳での情報開示されることとなった。汚染防止措置については、除去や浄化等を至上とする考え方から、原位置封じ込めなど適用可能な対策技術を認める方向、モニタリングによる管理と一体的に運用する方向へと転換が図られている。公共工事で地盤汚染に遭遇した場合においても、同法に示された環境安全性の水準を維持し、社会的な理解を得て対応策を進める必要があることから、本研究では、その問題認識、基本コンセプトについて検討を行うとともに、対策技術に加え、影響予測技術並びにモニタリング技術などを組み合わせた地盤汚染の制御技術について検討した。

2. 研究方法

2.1 公共工事で遭遇する地盤汚染の特徴、予測評価手法の現状と課題の整理

公共事業等における地盤汚染の形態を事例等を元に整理し、その特徴について検討した。

さらに、影響予測評価手法について、技術の現状等について調査を行い、課題を整理した。

2.2 建設工事で遭遇する地盤汚染対応マニュアルの

基本コンセプトの検討

これまでの成果を元に、建設工事で地盤汚染に遭遇した際に必要な技術的事項について検討を行い、対応マニュアルとしてとりまとめを行った。

2.3 影響検討に必要な入力条件の決定法の検討

影響検討に必要な入力条件（溶出特性、分散特性、吸着特性）について、実験等を元に検討を行い、その決定方法を提案した。

3. 研究結果

3.1 公共工事で遭遇する地盤汚染の特徴、予測評価手法の現状と課題の整理

公共事業等における地盤汚染の形態として、「建設用地内における不法投棄等」「最終処理場の跡地」「底質や鉱脈における自然汚染」「廃棄物のリサイクル」の 4 つを挙げ、その特徴を以下のとおり総括した。

- ・対象量が膨大で平面的に広い。
- ・健康被害が拡大する恐れよりも、対応策が理解されないことによって生じる混乱や、社会問題としての影響が大きい。
- ・浄化技術で対応できる分量や能力は限られ、処分地確保も難しい。
- ・「土壌」に当たるかどうか判断が難しいものが、汚染源となっている場合が多い（焼却灰混じり土、異物混入土、改良地盤、リサイクル材料、掘削ずり等）。
- ・固形化ないし固形物を含む汚染源から、周辺地盤への溶出安全性を判定する方法がない。

また、水溶性汚染拡大の予測手法の一つである、移流分散数値解析技術の現状と課題を、利用する側の観点から以下のとおり総括した。

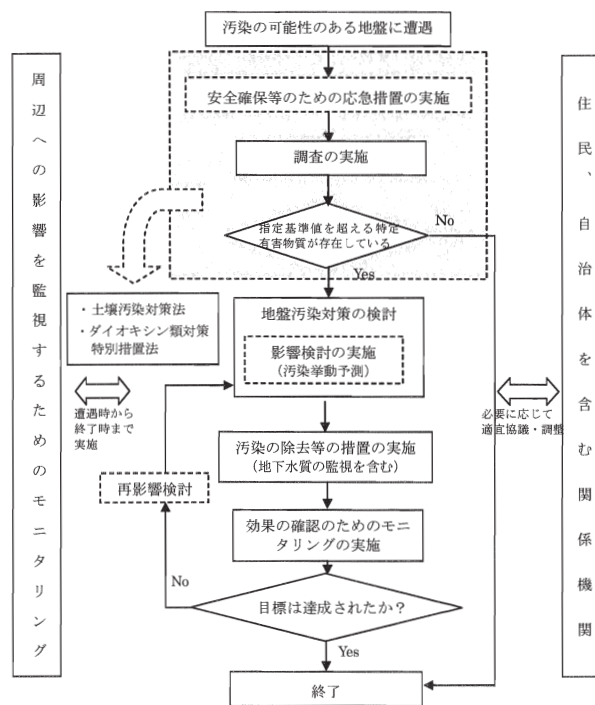
- ・移流分散解析については基礎理論が既に確立し、数値解析プログラムも普及段階に達している。今後は溶出濃度、分散長、遅延係数などの入力条件の設定法が課題である。
- ・定性的検討、一次元理論解、多次元数値解析など、予測手法の役割分化を明確にする必要がある。
- ・有害物質に応じた解析手法の選定や、解析メッシュや時間刻みなどの解析条件の設定でも、物質移行の予備知識は不可欠となる。

3.2 建設工事で遭遇する地盤汚染対応マニュアルの基本コンセプトの検討

このような地盤汚染問題の特徴をふまえ、マニュアルでは用地内で汚染土壌等を管理しながら利用する対策（リスク管理型工法）を提案するとともに、その手順とアカウンタビリティを確保するための影響検討手法を示した。有害物質のなかには地盤中で動きやすいため、汚染確認時点で即、危機管理対策に入らざるを得ないケースがある。その一方、重金属や農薬など一般に吸着性が高く、水と常時接触するとは限らないなどの理由から、地下水ないし地中水の流速に比べて動きにくい汚染も多い。しかし、現在のところ汚染の拡散速度に対する選別、動き易さを説明する手法が体系化されていない。挙動が緩慢なため短期的にモニタリング値を示せない場合には、予測解析技術によって有害物質の長期挙動を可視化し、対策効果のアカウンタビリティ確保を図っていく必要がある。図-1はマニュアル全体の流れ、図-2は影響検討の流れを示したものであり、基本コンセプトは以下のとおりである。

1) 接触することが極めて危険な状況、もはや水質事故などと考えられる状況などでは、まず、応急措置が先決である。

2) 応急措置を完了、もしくは、その必要のない状況に対しては、地下水位以上に存在し表面水の影響を受けていない状態、地下水位以上に存在し表面水の影響を受けている状態、地下水への溶出がみられる状態、敷地外の漏出に至っている状態など、表-1に示すように汚染の存在状態を段階区分し、汚染が次の存在状態区分に移行するまでの時間余裕を、対策安全性の目安とした。表中網がけの区分は、その有害物質が見つかる可能性が高い状態を示している。



(適宜実施する項目)

- …1)適宜、都道府県と協議し、調査の過程で土壌汚染対策法の調査命令の対象となった場合は同法に基づき調査・措置を実施する。
- 2)遭遇した地盤汚染が、自然的原因で存在する特定有害物質によるものでなく人為的な原因によるもので、人の健康被害が生ずるおそれがあると認められる場合は、土壌汚染対策法の調査命令の対象となる。

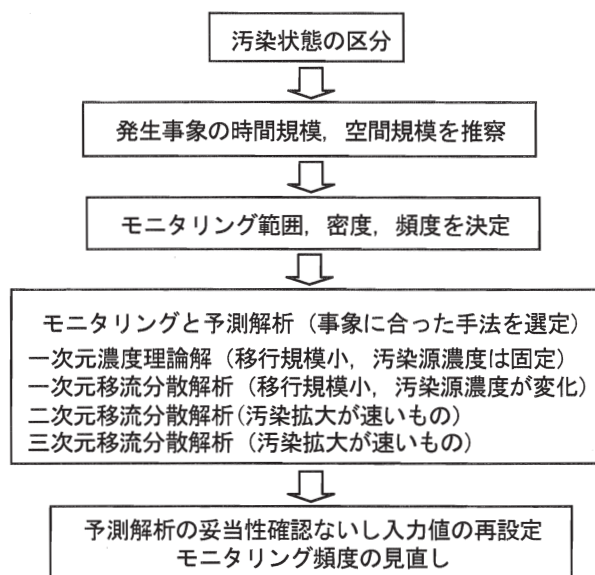


図-2 影響検討のフロー

3) 汚染拡大範囲の適当な距離を示すため、移行規模（流速×時間/遅延係数）という指標を導入し、表-2のような移行早見表を提示した。これにより、汚染確認の初動時に汚染拡大の時間、空間規模を大まかに把握できるようにした。また、汚染拡大の速さに応じて予測手法（解析法、定性的検討など）を適切に選

定できるように配慮した。特に建設工事で遭遇する汚染の多くは、汚染源が広く、保全対象までの距離（移行規模ないし予測対象距離）が至近であるため、一次元の移流分散解析や理論解で足りることが多い点などを示した。

4) 影響検討のプロセスに予測解析とモニタリングを組み込み、その役割を明確化した。予測解析の役割として、発生事象の時間規模ないし空間規模の把握、モニタリング方法（範囲、密度、頻度）の決定、長期的将来の外挿や非検出モニタリングデータの説明などを示した。また、モニタリングの役割として、予測手段の信頼性の検証、室内試験で得られない入力値の取得、入力定数の見直し再設定、当初仮定しなかった不確定要因の確認などを示した。

5) リスク管理型工法を「覆土敷土」「遮水工」「バリア井戸」「固化不溶化」に類型化し、適用条件、影響検討における評価事項、用いる予測手法の選定イメージを具体化した。例えば「覆土敷土」タイプでは図-3 (a) のように、一次元不飽和浸透流解析を用いて、当初見込んだ覆土や敷土の透水性、敷土を含む地下水までの地盤の透水性を、一次元移流分散解析（理論解も含め）を用いて、敷土層と地下水までの周辺地盤の遅延係数を検証し見直しを図る。「遮水壁工」タイプの不透水層に着底できない場合の工法では図-3 (b) のよ

うに、二次元もしくは三次元浸透流及び移流分散解析を用いて、囲い込み領域内で流速及び地下水濃度をモニタリングする位置や頻度を決定、有害物質の領域外方向への移行が、当初設計どおり推移しているかどうかを検証、領域内の透水性や遅延係数の見直しを図る。

6) 土壌汚染対策法においては搬出先が処分場、浄化施設、セメント等の原材料に限定されていること、さらにその逼迫も想定されること、不法投棄等による拡散を防ぐなどの点に鑑み、用地外へ搬出しない原位置処理を基本とした。

3.3 影響検討に必要な入力条件の決定法の検討

3.3.1 溶出特性に関する検討

汚染源からの溶出特性（溶出濃度、溶出時間、溶出総量）は、移流分散解析を用いて計算を開始するための前提条件となるものである。こうした重要性に鑑み、地下水下に水没した難透水性の汚染領域や固形体の浸漬溶出に関して、タンクリーチング試験による実証検討を行った。その結果、以下の知見が得られた。

1) 浸漬溶出特性を把握する方法として、成型試料を固液比 1:10 の浸漬水に水没させ、浸漬水濃度を測定するタンクリーチング試験がある。しかし、測定される浸漬水濃度に、体積や表面積などの水との接触条件の

表-1 有害物質の存在状態

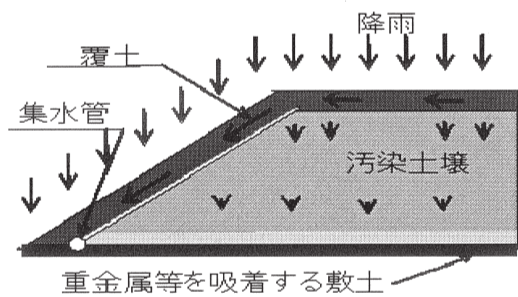
汚染の存在状態	第一種特定有害物質 揮発性有機化合物 (LNAPLs)		第二種特定有害物質 重金属等		第三種特定有害物質 農薬、ポリ塩化ビフェニル	
	不飽和帯	飽和帯	不飽和帯	飽和帯	不飽和帯	飽和帯
① 特定有害物質が地盤の不飽和帯に存在し、水の浸入がない状態						
② 特定有害物質が地盤の不飽和帯に存在し、水の浸入がある状態						
③ 特定有害物質が地下水に溶出している状態						
④ 特定有害物質により汚染された地下水が敷地外まで広がっている状態						
備考	建設工事で遭遇することが多いと考えられる汚染物質の存在状態					

影響が介入し、同固液比の下でも濃度値が変わることが確認された。

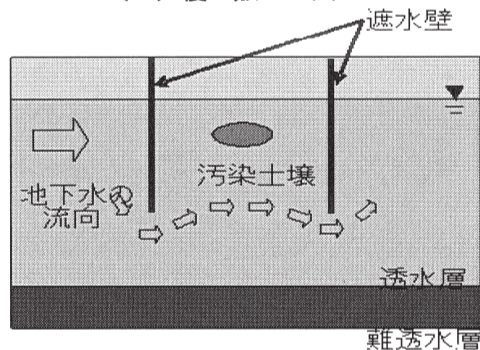
2) 「換算溶出深さ」(図-4) という概念を導入する

表-2 地下水中の有害物質の速度の目安

地下水流速 (m/年)	遷延係数				
	1	10	100	1,000	10,000
	六価クロム、ヒ素等		砒素等		
3.0×10^{-5}	300,000	30,000	3,000	300	30
3.0×10^{-4}	30,000	3,000	300	30	3
3.0×10^{-3}	3,000	300	30	3	0.3
3.0×10^{-2}	300	30	3	0.3	0.03
3.0×10^{-1}	30	3	0.3	0.03	0.003
3.0×10^0	3	0.3	0.03	0.003	0.0003
3.0×10^1	0.3	0.03	0.003	0.0003	0.00003
3.0×10^2	0.03	0.003	0.0003	0.00003	0.000003
3.0×10^3	0.003	0.0003	0.00003	0.000003	0.0000003
3.0×10^4	0.0003	0.00003	0.000003	0.0000003	0.00000003



(a) 覆土敷土工法



(b) 遮水壁工法

図-3 リスク管理型工法の例

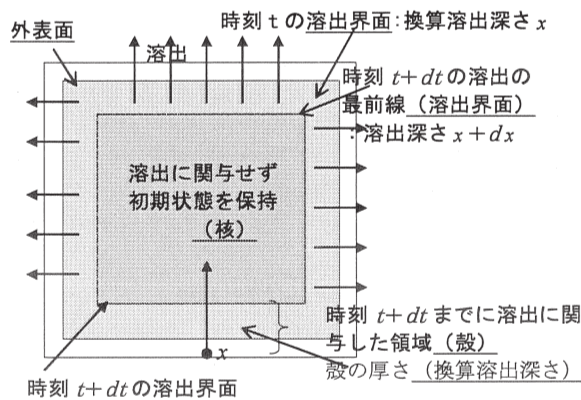


図-4 「換算溶出深さ」の概念

表-3 溶出換算深さの算定結果

No. 8			
供試体の寸法形状 40×40×40cm			
水没前の46号溶出量: C_0 4.29mg/l			
経過時間	浸漬水濃度 C (mg/l)	総溶出量 (mg)	換算溶出深さ x (cm)
1日後	0.033	40.9	0.06
3日後	0.044	54.6	0.08
7日後	0.041	50.8	0.08
14日後	0.046	57.0	0.09
28日後	0.064	79.4	0.12
91日後	0.086	107.3	0.13
182日後	0.39	483.4	0.61
No. 9			
供試体の寸法形状 15×15×15cm			
水没前の46号溶出量: C_0 1.33mg/l			
経過時間	浸漬水濃度 C (mg/l)	総溶出量 (mg)	換算溶出深さ x (cm)
1日後	0.036	2.2	0.07
3日後	—	—	—
7日後	0.049	3.0	0.09
14日後	—	—	—
28日後	0.057	3.5	0.11
91日後	0.14	8.6	0.27
182日後	0.21	12.9	0.42
365日後	0.58	35.6	1.31
547日後	1.02	62.7	2.89

ことにより、スケールや形状によらず溶出領域が、徐々に内部に進行する過程を再現できた。換算溶出深さは、汚染土壌のセメント固化処理体が水没した場合、91日で表面から約0.3cm、365日で約1.3cm、547日で約2.9cmとなり、溶出が関与する大まかな内部の範囲、ケースごとの大小を評価できることが確認された。

3) 固形体表面に発生源濃度を与える手法として、①タンクリーニング試験より浸漬水濃度歴を取得、②各時間帯の換算溶出深さを算出、③換算溶出深さの増分に相当する溶出質量を算出、④溶出質量を周辺地盤の固液比(含水比相当)で濃度換算する、などの手順を提案した。

4) 即応性の観点から、いろいろな固形体で換算溶出深さの標準値を蓄積し、実地では46号溶出量を代入するだけで済みます必要がある。さらに、タンクリーニングの実施に当たって、供試体を一次元的な形状にすることによって換算溶出深さの算定を簡素化する、形状保持が難しい固体への対応を図る等の配慮が必要である。

3.3.2 分散特性に関する検討

地盤汚染の影響予測に用いる分散長(縦分散長、縦横分散比)に関して、小型カラム試験、大型カラム試

験、大型土槽実験結果から、以下のような結論が得られた。

1)長さ 30cm の小型カラム試験で測定された縦分散長 αL は、溶液の種類、試験方法（投与過程と洗浄過程）、濃度、実流速（0.5~50m/d 程度）によらず、概ね 0.3~1cm（平均 0.61cm）となった。また、塩水を用いた 1.65m 規模の大型カラム実験でも、縦分散長 $\alpha L=3\sim 6$ cm 及び縦横分散比 $\alpha T/\alpha L=1/10$ を得た。これらは Neuman や Beims の文献値とも概ね一致した。

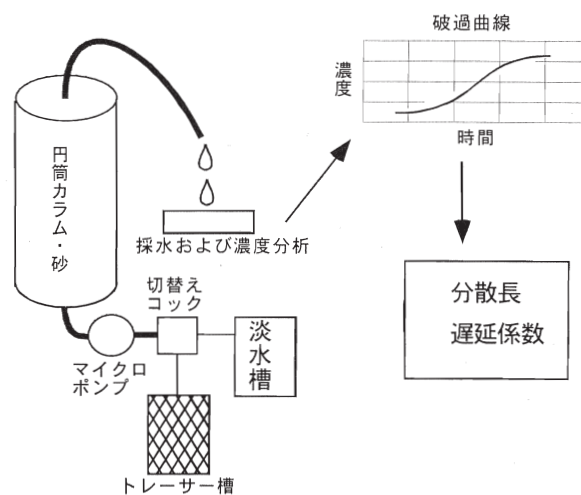
2)7m 規模の大型土槽実験で 1, 1, 1-トリクロロエタンの流速方向及び流水断面方向の挙動を測定し、軸対称二次元移流分散解析プログラムで同定した。その結果、縦分散長 $\alpha L=5$ cm と縦横分散比 $\alpha T/\alpha L=1/25$ の組み合わせの適合性が良好であった。ただし、解析では 5~6m 下流側横断面の比濃度 2%線が実際よりも太く再現され、縦分散長値は Beims 及び Neuman の縦分散長値の 1/2~1/5 レベル、縦横分散比も既往の研究データ（1/10）よりも小さな値を示した。

3) 大型になるほど、文献値が実測に基づく縦分散長より大きくなる傾向を示す原因としては、文献値のもとになった野外での実測例において、地盤条件や流速の把握精度が様々であることが一因と推定される。実流速の把握は流速流向計を地盤中に設置し直接計測するか、動水勾配、透水係数、間隙率をもとに推定するかのいずれかである。直接計測の場合には流向流速計の設置密度が十分でないと、領域全体の代表流速としてふさわしくない値が採用される恐れがある。

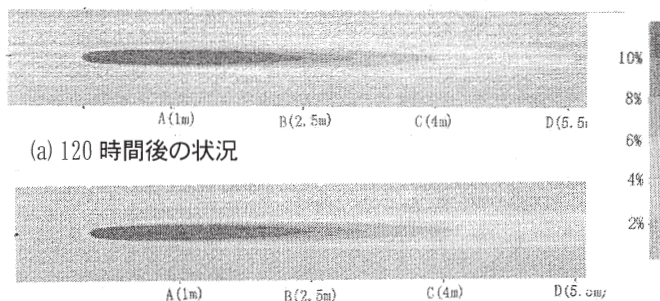
4) 実流速を透水係数などから推定する場合に、室内透水試験から水平透水係数（流速断面の透水係数）を正確に把握することが難しい。一般に水平透水係数は鉛直透水係数の 2~10 倍大きいと言われており、鉛直透水係数から求めた実流速は実際よりも小さくなる傾向がある。この実流速を移流分散解析に入力して、実際の現象との適合を図ろうとすると、より大きな分散長を設定して、実流速の過小評価分をカバーしなければならない。本節で紹介した大型土槽実験では、模擬地盤を人力施工後に 1 週間ほど通水しており、また、地盤内の水平透水係数を、実験中終始管理された流量メータと上下流側水位とから求めているため、上記のような不確実性をもった既往文献値を使用した場合に、移流分散現象を実際よりも安全側（大きめの到達範囲）に評価できたのではないかと考えられる。

3.3.3 吸着特性に関する検討

地盤汚染の影響予測に用いる遅延係数の取得法としてバッチ吸着試験法を提案し、その可能性や留意点



図一4 小型カラム試験の概要



(a) 120 時間後の状況

(b) 167 時間後の状況

図一5 軸対称二次元解析プログラムより得られた汚染拡散状況の平面図の例

について、カラム実験や大型土槽実験で検証し、以下のような結論が得られた。

1)いろいろな条件でバッチ吸着試験を実施した結果、分配係数の濃度依存性が遅延係数に直接反映することが確認できた。また、その変域は土質や pH による変化と同程度であることが確認された。

2) 規模 30cm のカラム実証試験から得られる、六価クロム、砒素、カドミウムの遅延係数と、バッチ吸着試験から得られる遅延係数とを比較検証した。その結果、実際の移行現象のなかでも、バッチ吸着試験と同様の濃度依存性が認められた。汚染源が時間的に一定濃度の状況下にあつては、バッチ吸着試験結果のなかから、汚染源濃度相当の遅延係数を採用する必要があることがわかった。移行規模が数 cm~数十 cm レベルでは、カドミウムのような濃度依存性の高い物質であっても、濃度分散領域が狭いため、発生源濃度相当の遅延係数を設定しておくことで、物質移行の予測評価が可能であることが確認された。

3) 砂地盤を模擬した大型土槽実験において一定濃度の六価クロムを投与し、軸対称二次元移流分散解析で

遅延係数を同定した。バッチ吸着試験では、発生源濃度と比濃度 0.1%との間で、遅延係数の濃度依存性が約 10 倍程度認められたが、いったん発生源濃度の遅延係数を設定しておくことで、3m 程度の物質移行現象を良好に再現することができた。

4) 汚染源と前線との中間濃度で遅延係数を設定しなければ、適切な予測評価が困難な場合があるか否かについては、濃度依存性の大きな陽イオン系重金属を、流速の大きな透水性地盤で長期にわたって拡大させるなどの場面で検証してみる必要がある。しかし、まずは最も高濃度である汚染源濃度で遅延係数を設定しておけば、吸着能を下限値で把握でき、予測を安全側に留めることが可能と考えられる。

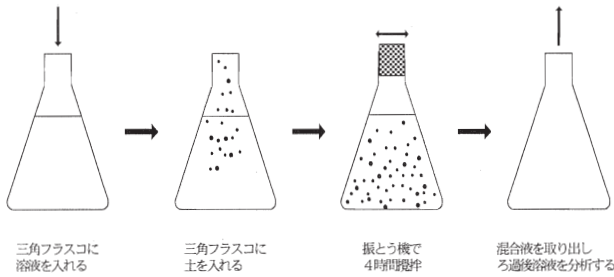


図-6 バッチ試験の概要

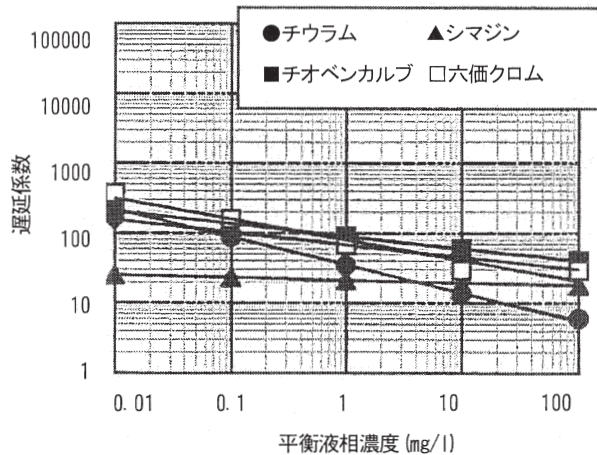


図-7 遅延係数の計測例 (重金属)

4. まとめ

1) 公共事業で遭遇する地盤汚染問題の特徴をふまえ、「建設工事で遭遇する地盤汚染対応マニュアル (暫定版)」を作成した。マニュアルでは用地内で汚染土壌等を管理しながら利用する対策 (リスク管理型工法) を提案するとともに、その手順とアカウンタビリティを確保するための影響検討手法を示した。影響検討手法においては、汚染の速さの選別、予測解析やモニタリングの意義、動き易さに応じた予測手法の選定法 (解析の種類、次元) を明確化した。

2) マニュアルに示した影響検討の手段である、移流

分散解析については、数値解析プログラムが普及段階に達しているが、溶出濃度、分散長、遅延係数などの入力条件の決定法が明らかになっておらず、それらの実証実験等に取り組んだ。その結果、

- ・ 固形物の汚染源からの溶出濃度に関しては、外表面からの浸潤深さの実測データを蓄積しておき、環境庁告示 46 号溶出量値をもとに溶出総質量を算出し、周辺地盤の含水比で地下水に放出される濃度に換算する手順を提案した。
- ・ 分散長の決定に際しては、移行規模 (着目スケール) の依存性があり、5~6m までの移行規模であれば、既存の移行規模との対応表の文献値が適用できること、また、浸透水の流速把握に不備があると、移行規模の誤認から、前線部の挙動予測では重大な誤差を生じる恐れがあることが確認された。
- ・ 遅延係数 (地盤中での吸着能) の決定に際しては、濃度依存性に対する認識が極めて重要であり、バッチ吸着試験から溶出濃度に応じた遅延係数を求めて入力する方法の妥当性を確認した。
- ・ 移流分散解析の入力条件に関しては、溶出濃度が把握できなければ、遅延係数の誤差が拡大し、さらに移行規模の依存性を有する分散長の不確定性を生む構図を明らかにした。

3) 公共工事等で遭遇する汚染形態の多くは、汚染源から保全対象までの距離が至近であるため、空間距離よりも猶予時間の評価に対する要請が大きいこと、そのため、今後の最重要課題は汚染源からの溶出濃度の決定法にあり、降雨や融雪の浸透、地下水位変動を受けた場合の溶出濃度の解明が最重要課題と考えられる。

参考文献

- 1) 上田年比古監訳, W. キンツェルバッハ著, パソコンによる地下水解析, 森北出版, pp169~171, 1990
- 2) H. Kohashi, et al, Research on the leaching characteristic of solidified soil, 第 48 回地盤工学シンポジウム論文集, pp. 397-402, 2003
- 3) ITRC, EPA, Technical and Regulatory Guidance for the Triad Approach : A New Paradigm for Environmental Project Management, 2003
- 4) 小橋ら, 地盤汚染の影響予測に用いる分散長の決定法について, 土木学会論文集 No. 764/III-67, pp. 53-67, 2004