

氏名	こはしひでとし 小橋秀俊
授与学位	博士(工学)
学位授与年月日	平成16年 月 日
学位授与の根拠法規	学位規則第4条第2項
最終学歴	昭和61年3月 東北大学大学院工学研究科土木工学専攻博士課程前期課程修了
学位論文題目	A Basic Study on Classification of Ground Pollution Pattern and Evaluation Method of Countermeasures (地盤汚染の形態分類とその対策の評価手法に関する基礎的研究)
論文審査委員	主査 東北大学教授 風間基樹 東北大学教授 真野 明 東北大学教授 西村 修 東北大学教授 千田 侑

論文内容要旨

本研究は、公共工事等で遭遇する地盤汚染問題の課題を明確にし、汚染を管理しながら有効利用を図る対策（「リスク管理型工法」と言う）で必要となる、対策の評価手法や説明理論の確立を目指したものである。本研究は5章から構成されており、1章が研究の目的と背景について、2章が地盤汚染及び評価手法の現状と問題点について、3章が対策の選定と評価手法について、4章が予測に用いる入力条件の決定法について、5章が結論及び今後の展望となっている。

1章では、土壤汚染対策法及びグリーン購入法の成立の背景に触れながら、本研究が汚染を管理しながら有効利用を図る対策（「リスク管理型工法」と言う）の評価手法の確立を目的としていること及び、全体構成について述べた。既往の研究の多くは、調査・解析・対策などの個別要素技術の深化に主眼が置かれている。これに対して本研究では、公共工事等で直面する地盤汚染問題の場面を踏まえ、対策の評価手法の確立にあたって、基礎的知見として重要なものとそうでないものとの明確化を、研究全体の基調に据えることとした。

2章ではまず2.1において、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」「セメント改良土からの六価クロム溶出」「他産業リサイクル材の受入れ」の5つを挙げ、その特徴を要約した。従来の汚染実態調査の報告などでは、行政機関が定期的に行なう土壤及び地下水汚染の件数、物質種、実施した対策技術の類型内訳など、統計整理が多いのが実情である。また、具体事例が紹介されている場合でも、汚染状況や対策

工法の詳述に終始しているものが多い。本研究では実際の対応過程で遭遇する場面を例示し、法令解釈の不明点、基準運用の問題点などにも踏み込んだ。

2.2においては、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課題を、利用する側の観点から以下のとおり要約し、解析技法の複雑化に陥りがちな傾向に一石を投じた。

3章ではこれら問題点を踏まえて、地盤汚染の評価手法の提案を行なった。既往の解析事例のなかでは、揮発性有機化合物などの非吸着で広域化し易い汚染が、解析対象となることが多い。しかし現実には、重金属、農薬や除草剤など一般に吸着性が高い、水と常時接触するとは限らない部位に位置するなどの理由から、地下水や地中浸透水の流速に比べて動きにくい汚染が占める割合も大きい。現在、動きにくいと言う証明手法が体系化されておらず、リスク管理型工法の信憑性が理解されない恐れがある。そのため、わが国では初めて、こうした説明に資する評価手法の構築に取り組んだ。その概要は以下のとおりである。

- 1) 有害物質の種類に応じて、遭遇する汚染状態を区分し提示した。
- 2) 汚染状態の区分が進行するのに要する時間を、対策の安全性の説明指標とした。
- 3) 汚染源から前線域までの大まかな距離を示す、移行規模（流速×時間／遅延係数）という指標を導入し、移行早見表を作成した。これにより、詳細データがなくとも、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。
- 4) 対策評価のプロセスに予測解析とモニタリングを併用することとし、その役割を明確化した。そのなかで、予測解析の役割としては、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、外挿や非検出モニタリングデータの補完説明などを明記した。また、モニタリングの役割としては、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明記した。
- 5) リスク管理型工法の類型化を行い、適用条件、評価事項、予測手法の選定イメージを具体化した。

4章では、水溶性汚染の予測に必要な入力条件として、溶出濃度、分散長、遅延係数を取り上げ、定数感度解析、実証実験、同定解析による検討を行なった。本章で特筆すべきは、予測結果を大きく支配するかどうか、現場実務での即応性やデータ確保の可能性といった観点から、望ましい決定法を考察している点が挙げられる。

4.1では、難透水性の汚染領域や固形体から、外表面から地下水へ溶出する時の濃度を決定する手法について、タンクリーチングによる実証検討を行った。汚染源からの溶出濃度及び溶出時間は、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。さらに、逆解析では汚染源の位置も不定条件となっているケースが多く、溶出の実績値などと照査しながら、距離の条件を絞り込まなければならない。現在我が国の公定溶出試験法には、土壤環境基準の運用を目的とした環境庁告示46号法、廃棄物を対象に処分場受入れ判断を目的とした環境庁告示13号法の2つがある。

これらは、粒状体での溶出ポテンシャルの把握を目的とした溶出試験であり、今のところ粒径2ないし5mmを超える固形物に対する溶出特性の評価法は確立されていない。固形物を対象としたタンクリーチング試験の研究においても、測定される浸漬水の濃度などを、予測解析の際の入力条件（周辺地下水に開放された時の濃度、溶出期間の把握）に直結させるための研究は立ち遅れている。こうした重要性に鑑み、固形体内部に水の浸潤領域が拡大する速さ、周辺地下水に開放される有害物質の溶出量などを、六価クロム模擬汚染土の固化処理体をタンクリーチング試験に供して検証した。

4.2では、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）の決定法について検討を行った。分散長は濃度前線の広がり的大小に関わる指標で、スケールに依存して決まる定数である。そのため、室内試験で求めることができず、実際の問題では既存文献値に頼らざるを得ない。既存文献値としては、Neuman, Moujin Xu, Beims などにより、統計的に導かれた図表ないし相関式が提案されており、文献値の表示精度、実測して求めた場合の安定性や再現性を検証しておくことは大きな課題となっている。公共工事等で遭遇する地盤汚染については、隣接地への長期的な影響判断にも大きなニーズがあることから、10m 以内のスケールでの検証を実施しておくことは有意義である。また、これまで国内外の研究者による、カラム試験や模型実験などによる縦分散長の実測同定例は多いが、同一地盤材料の下で観測規模、汚染物質の特性（種類、流速、濃度、初期条件）などの設定を変えながら系統的に実証した事例はみられない。特に、5m を超える規模で実際に揮発性有機化合物を使って大型実験を行い、縦横分散比の同定まで試みた事例はない。こうした点に鑑み、定数感度解析で分散長設定の注意点を把握するとともに、地盤条件をそろえて規模の異なる小型カラム試験、大型カラム試験、大型土槽実験に取り組み、縦分散長や縦横分散比の検証を行った。

4.3では、地盤汚染の影響予測に用いる遅延係数の決定法として、バッチ吸着試験による方法を提案し検討を行なった。遅延係数（あるいはそれを求める際に測定する分配係数）は地盤による物質の吸着能を表す指標であり、各重金属の分配係数を5ランク程度に区分し整理したもの、バッチ吸着試験で種々の重金属の分配係数を定量したもの、バッチ吸着試験及び大型カラム試験で求められる遅延係数を比較検証したものなどがある。しかし、遅延係数の決定に関与する諸定数（分配係数、有効間隙率、乾燥密度）が、遅延係数値に与える影響度、遅延係数の濃度依存性を現行の移流分散数値解析の入力機能にどう反映させるかという問題まで、踏み込んだ研究はない。こうした点に鑑み、バッチ吸着試験法の適用可能性や留意点について、定数感度解析、バッチ吸着試験、カラム実証試験、大型土槽実験などに、土質材料や有害物質の条件をそろえ一貫して取り組んだ。

5章では研究全体を総括した。そのなかで5.1においては以上の検討をふまえて、移流分散解析の入力条件の階層性や相互依存性の関係図を示した。従来、こうした全体像を明示した例はなく、関係図をもとに研究全体を総括し、今後の課題と技術の展

望について述べた。関係図では溶出濃度が把握できなければ、遅延係数及び分散長の不確定性が大きくなり、影響予測に大きな支障が出るという構図を明らかにした。最後に5. 2では、今後の課題と技術を展望し、以下の点を指摘した。

- 1) 公共工事等で遭遇する汚染形態の多くは、汚染源の規模に比べれば、保全対象までの距離（移行規模）が至近である。そのため、予測手法も実質的には、一次元の移流分散解析や理論解であることが多いと思われる。今後の研究課題としては、周辺地盤の不均質性の把握や解析技術の多次元化や高度化よりも、地表から汚染源までの水の到達条件、溶出濃度ならびに遅延係数の評価決定法の検討が優先課題と考えられる。
- 2) 汚染源までの水の到達条件については、本研究では、地下水より上部で発生する現象について言及できなかった。今後、移行早見表、予測手法の選定表を提示できるよう、降雨や融雪の表面流出特性、浸透限界深さ、浸透速度についての知見を集約することが望まれる。
- 3) 浸漬溶出濃度の評価決定法については、溶出した物質量が地盤内の地下水に開放された時の濃度を、実証実験などで確認すること、また、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、実地では環境庁告示 46号の溶出量を代入するだけで済ますなどの工夫が今後の課題となった。そのほか、内部溶出に関しても、汚染部の浸透範囲、浸透水量、環境庁告示 46号溶出量値などから、溶出濃度を推定する方法の確立などが、溶出特性に関するもう一つの大きな研究課題の柱と考えられる。
- 4) 遅延係数の評価決定法については、汚染源濃度と前線との中間的な濃度で設定すべき状況が、実在するかどうかの検証が待たれる。また、濃度依存性の場面としては、汚染源濃度（溶出濃度）の時間的変化への対応が残された課題である。今後の検討の方向性としては、移流分散数値解析に遅延係数の切り替え機能を装備するなどの、技法の複雑化を極力避け、初期設定だけでも予測が危険側にならないよう、また、過度に安全側に見込まれないような遅延係数の決定法を検討していくことが、望ましい姿と考えられる。

論文審査結果の要旨及び学力確認結果の要旨

論文提出者氏名	小橋 秀俊
論文題目	地盤汚染の形態分類とその対策の評価手法に関する基礎的研究
論文審査及び 学力確認担当者	主査 教授 風間 基樹 教授 西村 修 教授 真野 明 教授 千田 侑 (環境科学研究科)

論文審査結果の要旨

近年、土壤汚染対策法が施行されるなど、地盤汚染に対する社会的関心が高まっている。これら地盤汚染は社会活動の結果として生じたものであり、適切な対策を施してその実効性を評価することは重要な課題である。本論文は、建設工事で遭遇する地盤汚染の評価手法を地盤工学的観点から検討したものであり、全5章よりなる。

第1章では、土壤汚染対策法やグリーン購入法の立法化など、環境及びリサイクル行政を取り巻く社会的背景を踏まえて本研究の目的と全体構成を述べている。

第2章では、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のもらい汚染」「最終処理場の跡地」「底質や鉱脈における自然汚染」「セメント改良土からの六価クロム溶出」「他産業リサイクル材の受入れ」の5つを挙げ、地盤汚染の形態とその問題点を明らかにしている。また、地盤汚染の予測手法について既往の研究を整理している。

第3章では、建設工事で遭遇する地盤汚染の評価手法と説明理論のポイントを明らかにしている。リスク管理型工法の適用条件、評価事項、予測手段の選定イメージを明らかにし、汚染拡大の速さに応じて予測手段の選定目安を提示している点で有用である。

第4章では、水溶性汚染の予測に必要な溶出濃度、実流速、分散長、遅延係数などについて、定数感度解析、実証実験、数値解析を用いた検討を行なっている。

4.1節では地下水中に固形体や難透水性の汚染部位が水没し外周面から浸漬溶出した場合を対象として、地下水に開放される濃度や継続期間などの境界条件の把握法に関して、水没実証試験(タンクリーチング)による汚染固化体の溶出の評価方法を提案している。これは、新たに「換算溶出深さ」という概念を用いて説明したもので、環境庁告示46号の溶出試験値を基礎データにして、スケールや形状によらない溶出特性を評価可能にしている点に新規性がある。

4.2節では、地下水中で汚染物質の拡散予測に必要な分散長の決定法について、定数感度解析、カラム試験、大型土槽実験を用いて検証している。実際の有害物質を使って大型実験を行い、縦横分散比の同定を行うなど貴重なデータを与えている。

4.3節では、地盤の有害物質のバッチ吸着試験法の適用性を検討している。定数感度解析、諸条件下のバッチ吸着試験、カラム実証試験や大型土槽実験による検証を行ない、遅延係数の濃度依存性を指摘するとともに、実用上は汚染源の濃度を用いて問題ないことを示している。

第5章では、研究全体の結論を述べている。

以上、本論文は地盤汚染の形態を分類し、建設工事で遭遇する地盤汚染に対する指針を与えるとともに、地盤汚染の拡大・拡散の評価方法を実験的に検討し、評価手法の妥当性を検証したものであり、環境地盤工学の発展に寄与するところが大きい。よって、本論文は博士(工学)の学位論文として合格と認める。

学力確認結果の要旨

平成16年1月26日、審査委員ならびに関係教官出席のもとに、学力確認のための試問を行った結果、本人は地盤工学に関する十分な学力と研究指導能力を有することを確認した。

なお、英学術論文に対する理解力から見て、外国語に対する学力も十分であることを認めた。

論文審査結果の要旨

近年、土壤汚染対策法が施行されるなど、地盤汚染に対する社会的関心が高まっている。これら地盤汚染は社会活動の結果として生じたものであり、適切な対策を施してその実効性を評価することは重要な課題である。本論文は、建設工事で遭遇する地盤汚染の評価手法を地盤工学的観点から検討したものであり、全5章よりなる。

第1章では、土壤汚染対策法やグリーン購入法の立法化など、環境及びリサイクル行政を取り巻く社会的背景を踏まえて本研究の目的と全体構成を述べている。

第2章では、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のもらい汚染」「最終処理場の跡地」「底質や鉱脈における自然汚染」「セメント改良土からの六価クロム溶出」「他産業リサイクル材の受入れ」の5つを挙げ、地盤汚染の形態とその問題点を明らかにしている。また、地盤汚染の予測手法について既往の研究を整理している。

第3章では、建設工事で遭遇する地盤汚染の評価手法と説明理論のポイントを明らかにしている。リスク管理型工法の適用条件、評価事項、予測手段の選定イメージを明らかにし、汚染拡大の速さに応じて予測手段の選定目安を提示している点で有用である。

第4章では、水溶性汚染の予測に必要となる溶出濃度、実流速、分散長、遅延係数などについて、定数感度解析、実証実験、数値解析を用いた検討を行なっている。

4.1節では地下水中に固形体や難透水性の汚染部位が水没し外周面から浸漬溶出した場合を対象として、地下水に開放される濃度や継続期間などの境界条件の把握法に関して、水没実証試験（タンククリーニング）による汚染固化体の溶出の評価方法を提案している。これは、新たに「換算溶出深さ」という概念を用いて説明したもので、環境庁告示46号の溶出試験値を基礎データにして、スケールや形状によらない溶出特性を評価可能にしている点に新規性がある。

4.2節では、地下水中での汚染物質の拡散予測に必要となる分散長の決定法について、定数感度解析、カラム試験、大型土槽実験を用いて検証している。実際の有害物質を使って大型実験を行い、縦横分散比の同定を行うなど貴重なデータを与えている。

4.3節では、地盤の有害物質のバッチ吸着試験法の適用性を検討している。定数感度解析、諸条件下のバッチ吸着試験、カラム実証試験や大型土槽実験による検証を行ない、遅延係数の濃度依存性を指摘するとともに、実用上は汚染源の濃度を用いて問題ないことを示している。

第5章では、研究全体の結論を述べている。

以上、本論文は地盤汚染の形態を分類し、建設工事で遭遇する地盤汚染に対する指針を与えるとともに、地盤汚染の拡大・拡散の評価方法を実験的に検討し、評価手法の妥当性を検証したものであり、環境地盤工学の発展に寄与するところが大きい。よって、本論文は博士（工学）の学位論文として合格と認める。