

P04. 連続式簡易透水試験を用いた汚染評価および浄化設計

○和知 剛（アイ・エス・ソリューション）、小川えみ（同）

1. はじめに

土壌地下水汚染の浄化工法を選定するためには、汚染物質の種類に加え、その詳細な分布および地層の透水性を評価する必要がある。原位置での浄化を選択する場合、地中に存在するある濃度の汚染物質に対して、分解できる濃度と量の薬剤を到達させて反応させなければ浄化できない^{注1)}。実際の想定よりも高い濃度の汚染物質が存在すれば汚染物質は分解されずに残存し、汚染濃度の評価が適切でも薬剤が到達しなければ効果がない。

浄化工法選定の基本となるのはボーリング調査であり、コア観察により地層を判定するとともに、土壌や地下水を分析し汚染分布を推定する。浄化において、地層の透水性を評価するにあたり、最も基本となるデータはボーリングで得られた柱状図である。一般に、砂層は透水性が高く、シルト層や粘土層では透水性が悪いことは、水理地質の専門家でなくてもイメージできる。問題は、ボーリングコアから地層を判別する能力は個人差が大きいことであり、この主観的なプロセスを経た地層判別の評価に基づいて、間接的に透水性を推定しなければならない。いうまでもなく、薬剤注入による原位置浄化の成否は、この透水性の評価にかかっている。

地層の透水性を評価する方法として、汚染現場ではスラグ法などの単孔式透水試験が広く用いられている。しかし、スクリーン区間全体の透水性を評価することとなるため、1つの帯水層で詳細な透水性を評価しようとする、スクリーン深度を変えた複数の井戸を設置する必要が生じる。これにはコストと時間が必要となる。

浄化方法の選定にあたり、薬剤の到達を評価する方法として、連続式簡易透水試験の測定方法およびその特徴を述べるとともに、具体的な調査事例により、汚染物質のスクリーニング調査と組み合わせた汚染浄化の設計への活用法について紹介する。

2. 連続式簡易透水試験

(1) 測定手順

装置は、米国ジオプローブ社製のダイレクトセンシング技術のひとつである **Hydraulic Profiling Tools** ^{注2)}（以下、HPT）を使用した。装置の概要を図-1に示す。

装置は、先端に水が吐出する孔および内部に水圧計を備えたプローブ、ボーリングロッド、水タンク、ポンプおよび流量計を内蔵したコントローラー、データの表示記録装置および自走式ボーリングマシンから構成される。

HPT プローブには、ウェンナー配置（4ピン）の電極が配置されており、地層の電気伝導度（以下、EC）も連続的に測定できる（図-2）。このため、打ち込み時は、プローブにおいて水圧と電気伝導度の両方のデータがリアルタイムに測定でき、地層の透水性の多面的な評価が可能となる。

タンクの水をポンプで吸い上げ、ボーリングロッド内部の送水管を通して先端の HPT プローブ側面の孔から水を吐出する。プローブ内部に設置されている水圧計により、送水中の水圧は常時モニタリングされ、粘土やシルトのような難透水性の地盤では送水管内の水圧が高まり、粗粒な

砂などの透水性が高い地盤では相対的に圧力が低下する。打撃式ボーリングマシンで HPT プローブを打ち込むことにより、プローブ内の水圧と送水流量が、約 1.5cm 打ち込む毎に 1 回記録される。

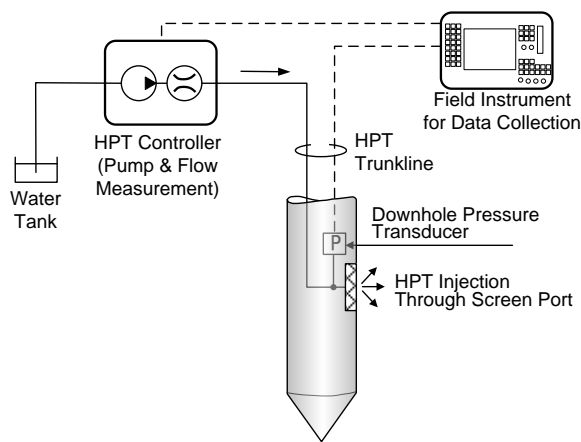


図-1 HPT システム装置概要

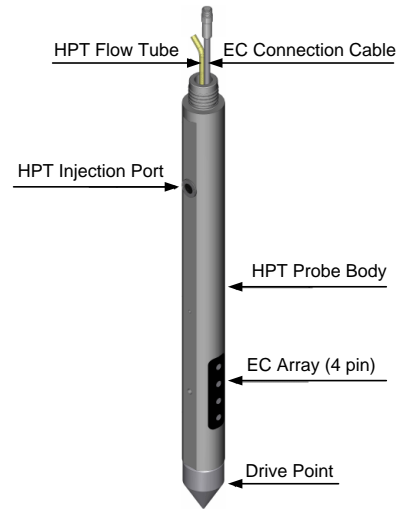


図-2 HPT プローブの概要

(2) 長所および制限

HPT プローブは、水圧計のような精密部品を内蔵しているものの、打撃により打ち込むことが可能である。加えて、図-1 に示すデータ記録装置、ポンプやコントローラーはコンパクトにまとめられ軽量であるため、台車などを用い移動しやすい。

測定する地質状況と水圧計の能力により HPT システムの適否が決まる。適用できる地質は、固結していない粘土、シルト、砂や礫に限定される。プローブ内蔵の水圧計は、およそ 700kPa が限界であるため、実質的には、地層の水理特性にもよるが、地下水面下 36m が限界とされる。

3. 土壌・地下水汚染の 3 次元的な評価

(1) 必要とされる評価条件

薬剤注入による原位置浄化では、より詳細な 3 次元汚染分布を把握する必要がある。既存ボーリング調査により汚染物質の種類や到達深度が分かっている場合、土壌汚染濃度を公定法による精度の高い分析によって汚染の分布を求める必要はない。むしろ、より多地点で、鉛直方向に連続的に土壌汚染の概略濃度を簡易分析により把握し、原位置浄化が困難な原液のようなホットスポットの存在位置を明確にする方が原位置浄化を設計する上では重要となる。

土壌地下水汚染の詳細分布の作成には、HPT と同じく、センサーを打ち込みながら、揮発性有機化合物 (Volatile Organic Compound、以下 VOC) の汚染濃度を、連続的に、かつ、リアルタイムに測定できる Membrane Interface Probe^{注3)} (以下、MIP) を用いた。

(2) MIP による調査

MIP システムは、ボーリングロッドの先端のプローブのヒーターで土を熱し、VOC のガス化を促進させ (図-3)、メンブレン膜を介してプローブ内に取り込み、地上の検出器で分析する (図-4)。検出器は PID (光イオン化検出器) を用いるが、対象とする汚染物質の種類により適切なものを選択する。

メンブレン膜は、水を通さずガスのみ通過させる性質があるため、不飽和帯だけでなく、飽和

帯中の VOC についても検出することができる。ただし、このシステムでは存在する VOC の総量を電圧強度にて測定するため、個々の物質の濃度が定量できる訳ではない。

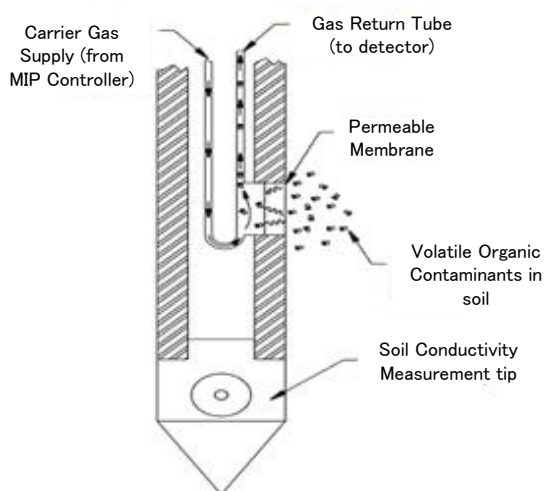


図-3 MIPプローブの構造

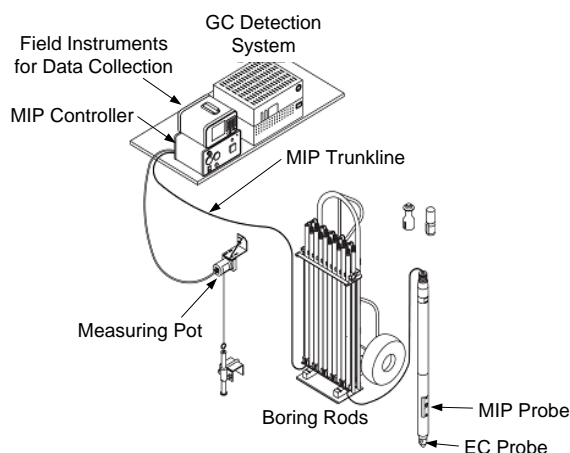


図-4 MIPシステム

4. 調査事例

(1) 対象地の概要

調査を実施したのは、トリクロロエチレンを取り扱う電子機器工場の跡地であり、既存ボーリング調査で土壌・地下水汚染が存在していることが判明しているサイトである。しかし、既存調査時には、建屋および基礎構造物が残っていたことから、汚染源の確定や汚染拡散のメカニズムが把握できていなかった。土壌汚染も深度 20m 付近まで認められていることから、ホットスポットの掘削除去等の割合を極力減らし、原位置浄化を中心とした浄化方針および工法を決定するために、HPT および MIP による詳細調査を実施した。

(2) 調査結果

代表的な断面を図-5に示す。不圧地下水が深度 8m 付近に存在し、およそ A1 から A4 方向に流れている。HPT の結果から、いずれの地点でも水圧は 15m 以深で極端に高くなり、測定限界のおよそ 700kPa を超えており、ここに透水性の境界が存在している結果となった。

一方、MIP の結果から、汚染物質は深度 16m 付近の砂質シルトと上位のシルト質砂との境界付近に存在している。

(3) 評価

当サイトでは、HPT および MIP の詳細調査は完了しておらず、詳細な汚染機構の解明には至っていない。また、高濃度の汚染物質が表層から連続的に検出される汚染源は確認できなかった。

図-5の断面では、汚染物質が HPT 調査での透水性が低い地層中に存在し、その上位にピークが確認されていないことから、これら 4 地点とは別の地点から汚染物質が地下浸透し拡散したものと考えられる。

この汚染に対して薬剤注入による浄化を計画する場合、井戸やボーリングロッドによるポイント注入では、汚染物質の存在する地層に薬剤はほとんど浸透しないと推定される。対策深度が深度 3~4m 程度であれば、バックホウなどの重機を用いた土壌攪拌により難透水性の地層と薬剤を混合させる方法もある。しかし、今回は深度も深く、深度 14m までは土壌汚染もないため、柱状改良機などの深部混合が可能な工法を採用すると、非汚染深度の施工割合が多くなり、費用対効

果が低い結果となる。

例えば、浄化工法のひとつとして、この難透水層に対してハイドロフラクチャリングを用いて人工的な透水性の良い砂の薄層を形成させた後に、設置した井戸から微生物分解促進剤などの持続性の高い薬剤を注入するなどの方法^{注4)}がある。

今回の調査では、HPT 調査はおよそ深度 18m の測定を 1 日あたり 5~6 地点、MIP 調査は同深度で 1 日あたり 2~3 地点を施工することができた。

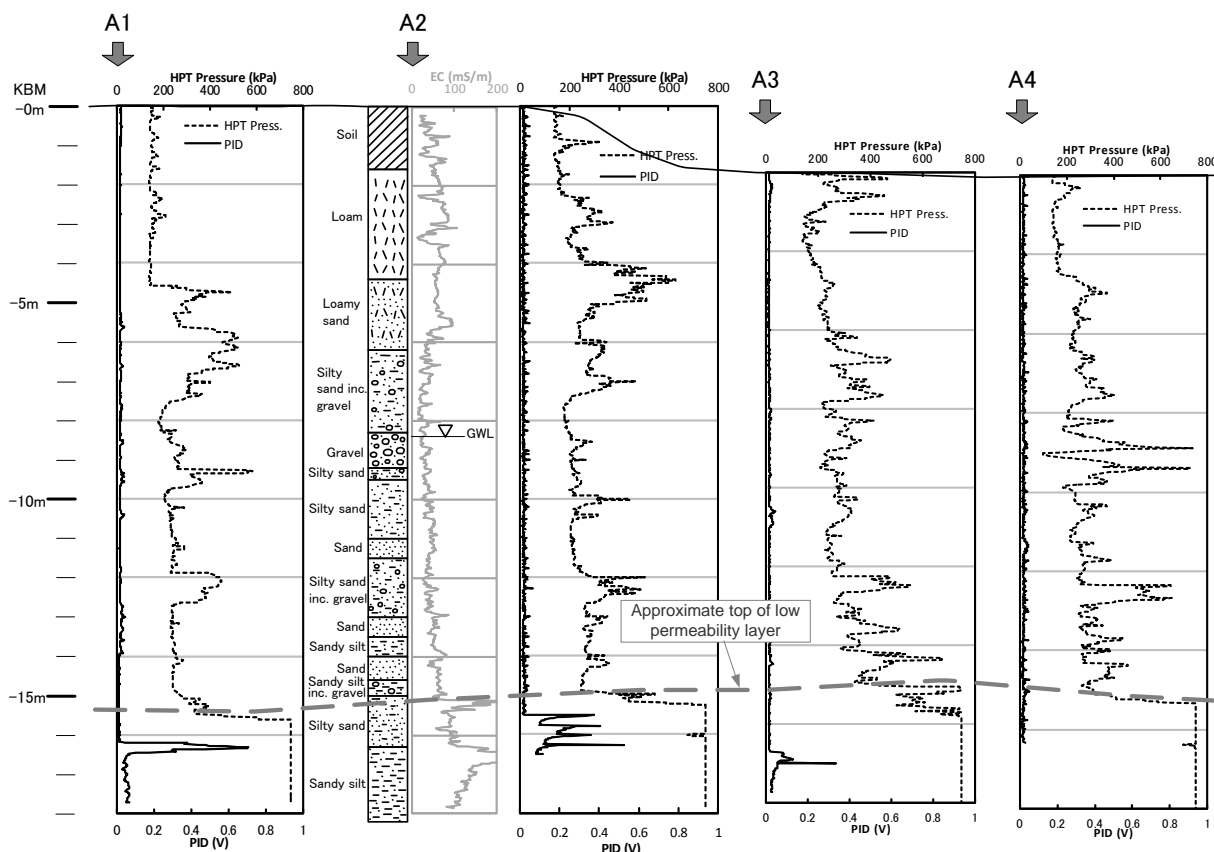


図-5 HPT 調査の水圧分布と MIP 調査の PID 検出状況の断面評価

5. おわりに

HPT および MIP を組み合わせた調査結果を用いることにより、地層の透水性や詳細な汚染位置を分かりやすく表現することが可能となった。これらの調査結果がリアルタイムに表示されることで、現場技術者がこれらの測定をしながら、汚染の詳細分布や薬剤注入時の拡散性をイメージすることが可能となったことで、より高度な次元で浄化の設計を行うことができると考える。さらに、実際に行った浄化対策の効果についても、これらのダイレクトセンシング技術を活用し、評価していくことが重要となる。

参考文献

- 1) 佐藤秀之・吉村雅仁 (2007) : 地下水浄化設計における注入量算出手法の検討~原位置水理地質特性評価、日本地下水学会 2007 年秋季講演会予稿集。
- 2) Steve Knobbe (2006) : Hydrostratigraphic Characterization using the Hydraulic Profiling Tool (HPT). Geoprobe Systems Technical Bulletin: MK3099.
- 3) 小林ほか (2013) : ダイレクトプッシュテクノロジーによる 3 次元な汚染の把握と浄化設計への活用、地下水・土壌汚染とその防止対策に関する研究集会、第 19 回講演集. P554~555.
- 4) 中間ほか (2004) : ハイドロフラクチャー法を応用した汚染土壌の原位置浄化方法、土木学会第 59 回年次学術講演会、p509-510.