地盤改良技術と環境保全

5. 地盤環境汚染対策としての地盤改良技術[†]

木 暮 敬 二* 川 地 武**

Ground Improvement and Its Environmental Impacts

V : Ground Improvement as a Measure for Contaminated Geo-Environment

by

Keiji KOGURE* and Takeshi KAWACHI**

Key words : Soil contamination, Ground water pollution, Ground improvement, Environment quality standards for soil contamination, Insolubijization, Containment, Extraction

1 は じ め に

空気、水とならび重要な環境要素である土および地盤の汚染は我が国では明治時代の足尾銅山鉱毒事件に始まるが、全国的に土壤汚染が認識されるようになったのは、1960年代の重金属等を含む鉱山排水が流入して問題化した農地の土壤汚染以来であろう。農地の土壤汚染は表層地盤の場合が多いため、対策は客土等により行われ、一応沈静化したが、その後1980年代に至り、工場跡地などの再開発に伴い、新たに市街地の土壤・地盤汚染が問題化し、現在に至っている。欧米でもほぼ同時期に土壤汚染が問題となり、現在では土壤・地盤汚染対策に関する国際会議が定期的に開催されている。汚染土壤、汚染地盤の対策は土地の用途、周辺環境、汚染レベル、修復に関する考え方等の違いにより国により異なるが、ここでは我が国の市街地土壤の汚染の現状と対策技術について概要を述べる。なお、汚染問題では土壤汚染と地盤汚染の区別が明確ではないが、ここでは便宜的に地下水不飽和帯の汚染を土壤汚染、地下水飽和帯をも含めた汚染を地盤汚染と呼ぶことにする。

2 汚染土壤とは

土壤は地殻構成物が風化、堆積等を経て生成したという来歴を考えると、地殻成分として含まれる有害な重金属なども微量ながら含まれる。したがって、重金属などの有害成分が土の本来有する含有濃度レベルより高いかどうか判断の基準となる。自然由来の重金属含有量を表Ⅰに示す。

表のように、重金属含有レベルにはかなりの幅があり、地域によってはかなり含有レベルが高い。我が国では砒素の自然含有レベルの高い地域が知られている。²⁾ また、最近話題になるトリクロロエチレン、テトラクロロエチレンなどの揮発性有機化合物 (VOC) や農薬のように本来土に含まれない成分の場合には含有の有無が汚染の有無となる。このように汚染物質の含有量で汚染程度を判

表Ⅰ 自然土の有害重金属含有量¹⁾

元 素	中央値	範 囲
砒素(As)	6	0.1~40
カドミウム(Cd)	0.35	0.01~2
クロム(Cr)	70	5~1500
水銀(Hg)	0.06	0.01~0.5
鉛(Pb)	35	2~300
セレン(Se)	0.4	0.01~12

単位は mg/kg

断する場合がある。また一方、汚染物質が有害なレベルにあるかどうかは、汚染物質の毒性や汚染経路によっても異なる。そこで、土中の汚染物質が有害な作用をもたらす経路を考慮して有害性を判定する場合がある。土中の有害物質が浸透する水に溶解出し、この水を飲用したり、農作物を経由して人体が摂取する経路を考える場合である。この場合には土の有害性は水に溶出する有害物質の濃度レベルで判定される。我が国の土壤汚染の判定では地下水経由の侵入を主体に考え、試験方法、判定基準が設けられている。試験は環境庁告示46号により、風乾土を10倍量の水に懸濁させ、振とう抽出した検液の汚染物質の濃度レベルの測定によって行う。この測定値を土壤汚染に係わる環境基準と比較し、汚染性が判定される。現在、環境基準は25項目について表Ⅱのように設定されている。ここに示される基準値は地下水環境基準と同一であり、さらに地下水環境基準は飲用水基準とほぼ同等である。

このように、土壤の汚染性は望ましい環境目標である土壤環境基準のみで判定され、その際には土地の利用目的、周辺環境、地下水の利用状況など考慮されない。このことが汚染地盤の対策立案に柔軟性を欠くことになり、

[†] 原稿受理 平成12年1月31日 Received Jan. 31, 2000

* 正 会 員 防衛大学校土木工学教室 〒239-0811 横須賀市走水, National Defense Academy, Hashirimizu, Yokosuka, 239-0811

** (株)大林組技術研究所 〒204-0011 清瀬市下清戸, Obayashi Co. Ltd., T.R.I., Shimokiyoto, Kiyose, 204-0011

Table II. 土壌の汚染にかかわる環境基準³⁾

項 目	基準値
カドミウム	0.01mg/L 以下
全シアン	不検出
鉛	0.01mg/L 以下
6 価クロム	0.05mg/L 以下
砒素	0.01mg/L 以下
総水銀	0.005mg/L 以下
アルキル水銀	不検出
セレン	0.01mg/L 以下
PCB	不検出
ジクロロメタン	0.02mg/L 以下
四塩化炭素	0.002mg/L 以下
1,2-ジクロロエタン	0.04mg/L 以下
シス-1,2-ジクロロエチレン	0.04mg/L 以下
1,1,1-トリクロロエタン	1mg/L 以下
1,1,2-トリクロロエタン	0.006mg/L 以下
トリクロロエチレン	0.03mg/L 以下
テトラクロロエチレン	0.01mg/L 以下
ベンゼン	0.01mg/L 以下
1,1-ジクロロエチレン	0.02mg/L 以下
有機リン	不検出
1,3-ジクロロプロペン	0.002mg/L 以下
チウラム	0.006mg/L 以下
シマジン	0.003mg/L 以下
チオベンカルブ	0.02mg/L 以下

現状の対策技術のレベルでは到達不可能な場合や膨大な費用負担と修復期間の長期化を招く場合がある。オランダはじめ海外⁴⁾に見られるような、より合理的な修復戦略を構築できるような基準のあり方やリスク評価を基礎とする修復体系が望まれるが、そのためには、地盤中の汚染物質の挙動に関する情報の蓄積が不足しているともいえる。

3 汚染地盤対策技術の現状

3・1 対策技術の分類

汚染された地盤の対策技術として実用化あるいは開発中のものを表Ⅲに示す。この表には汚染物質の抽出・除去や分解を目的とする修復技術と適用実績の最も多い汚染物質の封じ込めや不溶化による汚染の拡散防止技術も含めている。これらの対策技術を対策の施工方式で分類すると原位置方式、場内プラント方式、場外方式とに分類できる。原位置方式は一般の地盤改良工事と同様、土を掘削しないで対策を行う。一方、場内プラント方式では汚染した土や地下水を地上の処理プラントで処理する。その手法としては洗浄、混合、加熱などがあり、処理は装置内で行われる。ここでは、地盤改良の技術や知見はあまり参考とはならない。また、場外施工方式とは汚染

土を場外の処分場や密閉容器に運び、最終処分されるものを指し、やはり地盤改良技術とは異質の技術といえる。なお、例えば VOC を地下水揚水法で処理する場合には地上で気液分離や活性炭吸着などのプラントを要するように、上述の施工方式に完全には分類できないものがあるが、ここでは主要な工程により分類している。表Ⅲに示した対策技術のいづれを選択するかは、汚染物質、汚染の程度、対策の目的、周辺環境、許容される対策費用などを考慮して決定される。

3・2 対策技術の概要

地盤改良技術の延長と思われる手法については 4 章に詳述するので、ここでは非地盤改良系の手法について概要を述べる。

① 洗浄

土から特定の物質のみを抽出・除去する技術は採鉱分野の有価金属の抽出・回収の延長技術⁵⁾であり、汚染物質の種類、形態、目標とする修復程度などにより各種の技術が選択できる。洗浄・分級による方法は汚染物質が土のシルト・粘土の粒径部分に吸着あるいは沈着する傾向が高い現象に着目したもので、掘削した汚染土を物理的に砂と細粒分に湿式分級し、汚染物質を泥状の細粒部に集め、この部分を脱水し、減量化し、さらに汚染物質の固定化や分解などの手法で処理する。洗浄された砂部分は回収し、清浄土として利用する。この方法は汚染土の細粒分が 10% 以下の土では有効といわれ、洗浄・分級する際に界面活性剤あるいはキレート剤などを用いる場合もある。

② 汚染物質の分解

水銀、砒素、鉛などで汚染された土壌には熱処理⁶⁾が有効である。これらの汚染物質は 500℃前後と比較的低温で揮発するため、ロータリーキルンなどの地上プラントで加熱し、気化あるいは粉塵としてフィルターで捕捉する。処理された土は汚染物質が除去された清浄土であるが、土としての物性も相当変化している。また、温度によっては他の物質が活性化し、溶出しやすくなる場合があるので注意が必要である。なお、加熱処理は重金属と油や揮発性有機物質などとの複合汚染の場合には特に効果的である。

VOC のうちトリクロロエチレンなどの塩素系化合物は脱塩素化して分解すれば無害となる。この脱塩素反応を化学的に行う方法も開発されている。例えば、ピット内の土に栄養分と還元剤を添加し、微生物活動を活性化して強還元状態とすることにより、脱塩素化する土壤還元法⁷⁾がある。この場合、土は ORP (酸化還元電位) が -200mV 前後に維持される。多くの有機物質は加熱や微生物作用により分解する。加熱は土をキルン等投入して行うもので、VOC のように揮発性の汚染物質を徹底的に除去するもので、高い浄化目標が短時間に達成できる。微生物による方法はバイオレメディエーションとも呼ばれ、地上のプラントで行う場合と原位置で行う場合がある。前者では汚染物質の分解特性の高い微生物の選択や培養条件が重要である。また、後者では地盤内における

表Ⅲ 地盤汚染対策技術の分類と適用特性

大分類	方 法	方 式			適用物質		
		原位置	場内プラント	場外	重金属	VOC	農業等
封じ込め	遮断構造			○	○	○	○
	遮水構造	○		○	○		○
	反応・浄化壁	○			△	○	
固化・不溶化	薬剤処理	○	○		○		△
	溶融	○		○	○		○
抽出	揚水・真空吸引	○	○			○	
	洗浄		○		○		○
	電気泳動	○			○		
分解	加熱		○	○	△	○	○
	化学分解		○	○		○	○
	微生物分解		○	○		○	○

適用物質欄の○は適用可能,△は物質や条件により適用可能を表す

微生物活動の制御が必要であり、通常の地盤改良に比べて高い施工管理やモニタリング技術が必要と思われ、まだ我が国では本格的な適用には至っていない。微生物処理の特徴は土の物性変化が少ないこと、処理期間が長くなるが、比較的低コストですむことなどが挙げられる。

③ 溶融

汚染土あるいは地盤に高電圧の電気を流し、ジュール熱により土を溶融し、ガラス状に固化化することにより汚染物質を固定化する技術⁸⁾が開発されている。溶出防止効果は高いが、我が国のように地下水が豊富で住宅・工場が密集する条件では原位置処理技術としての適用性には限界があろう。むしろ、難分解、難処理性の汚染物質を確実に処理するプラント技術として位置づけられる。

4 地盤改良技術の適用と課題

4・1 固化・不溶化

汚染物質の溶出を防ぎ地下水への影響を除く手法であり、通常は不溶化剤やセメントなどの固化剤を混合し、溶出防止を図るもので、採用事例が多い。その際、原位置で不溶化処理をする場合と処理土を管理型処分場へ処分する場合がある。この手法では汚染物質の種類、形態による適切な薬剤の選定、土と薬剤の確実な混合のための混合プラントや施工方法の選定、施工管理が重要であり、従来のセメントや石灰による地盤改良の際の管理技術が応用されるが、その管理レベルは高いものが要求される。この手法で問題となるのは、不溶化薬剤の均一な混合、不溶化効果の持続性、安定性⁹⁾である。また、通

常の地盤改良の場合と同様、改良効果の簡便な判定方法の確立が課題である。

4・2 封じ込め

工場跡地や廃棄物処分場跡地などで汚染物質の周辺への拡散を防止する応急的な対策として汚染土を収納する構造物に処分し管理する場合があります。採用事例も多い。この場合、構造物の密閉性により遮断型と遮水型の処分構造物に分類される。前者では土からの汚染物質の溶出性が表Ⅱの環境基準を満足できない場合に鉄筋コンクリート製の容器に収納・管理する。一方、汚染物質を原位置に封じ込めたり薬剤処理後に管理型処分場に処分する場合がある。この場合の遮水工の構造は一般廃棄物処分場の場合と同様であり、厚生省により構造基準¹⁰⁾が定められている。環境庁による土壌汚染調査・対策指針および運用基準では、これを受けて原位置封じ込めの場合の例を図1¹¹⁾に示すように、遮水壁の止水性が透水係数で $10\text{nm/sec}(10^{-6}\text{cm/sec})$ 以下が必要としている。この遮水構造の止水性のレベルについては議論がある¹²⁾が、止水レベルを原位置の遮水構造物で実現することは地盤改良技術の課題であろう。

なお、現在の環境庁の指針ではVOCによる汚染地盤の封じ込めによる対策は認知されていない。止水技術の現状に関して低い評価しか与えられていないと思われ、地盤関係者の一層の情報発信が望まれる。いずれにせよ、従来の止水レベルを超える遮水壁技術が課題であろう。

一方、遮水壁の一部を透水性とし、通水中に汚染物質

図1 汚染土壌の封じ込め構造例

を処理する機能を備えた反応・浄化壁が開発されている。¹³⁾ (図2) VOC 汚染地盤の地下水対策として検討される場合が多いようであるが、壁内に組み込む反応物質や機構によっては、六価クロムや砒素など移動性の重金属にも適用可能と思われる。汚染地盤から汚染物質が周辺に拡散する事態を防ぐもので、汚染源対策が困難な場合でも周辺の汚染の防止を可能にする技術として注目される。

4・3 抽出

汚染物質を土から抽出する技術は、本来の汚染土の修復に相当する。汚染物質を含んだ形で長期にわたって管理する必要のある上述の拡散防止や溶出防止に比べて、汚染物質から解放されるため、より高度な対策といえる。VOC などの汚染の場合には地下水揚水や土壌ガス吸引(SVE) による方法も有効である。トリクロロエチレンなど水より比重の大きい DNAPL (Dense Non-Aqueous

Phase Liquid) は水への溶解性も低いいため地下に濃厚なプリュームを形成して存在する。この濃厚な部分をポンプにより吸い上げるため、効率は良いが、濃厚部分を特定する事前調査が重要であろう。また、VOC は水より蒸気圧が高く、揮発性であるため不飽和帯にガス状で存在する割合も高い。この VOC や地下水に溶解した VOC を真空吸引法で吸い上げ、地上で処理する方法も採用実績が多い。これらも方法は従来のディープウェル工法やウエルポイント工法の延長であり、古典的地盤改良技術の新たな展開分野ともいえる。この場合、処理当初は効率良く吸引できるが、浄化の進行につれ効率が低下し、めざす修復レベルになかなか到達できないケースが多い。揚水や吸引による場合の浄化レベルの予測技術の開発が課題といわれる。

また、地盤に微弱な直流電流を流し、溶出性の重金属を電気泳動させ、陽イオンは陰極に、陰イオンは陽極に集め、水に溶けた汚染物質を電極部の排水により除去する電気化学的な処理方法が開発されている。¹⁴⁾ 汚染物質の種類により最適な通電条件、排水方法などが異なり、また浄化に要する期間が比較的長い。この方法は汚染土を掘削することなく原位置で重金属を除去できる点に特徴がある。この手法もかつて、電気浸透工法として軟弱粘性土地盤の脱水工法として開発されたものを基礎とした工法であり、古典的地盤改良工法の再生版といえる。適用範囲の明確化、効率向上などが課題と思われる。

5 おわりに

汚染地盤対策としての浄化、修復、拡散防止などの技術は周辺分野の技術の応用や改良により実用レベルとすることが可能であろう。問題は上あるいは地盤をどの程度に修復し、リスクを軽減した状態で、地盤をどう利用

図2 浄化壁の概念図

するかを明確にすることである。対策のレベルが明確化されれば、修復レベル、許容費用、期間が決定されようが、我が国ではまだそのような議論が尽くされていないように見受けられる。制約条件が与えられて発達してきた地盤改良技術も多く、このような条件が明示されれば地盤改良技術のさらなる発展が期待でき、環境修復の分野でも大きく貢献できるものと思われる。

参 考 文 献

- 1) H. J. M. Bowen, “環境無機化学 (浅見輝男・茅野充男 訳)”, p.55 (1983) 博友社.
- 2) 中島宣雄, 水環境学会誌, **20**, 7, 2 (1997).
- 3) 環境庁, 土壌の汚染に係る環境基準について (環境庁告示 第46号) (1991).
- 4) 佐々木憲一, 土と基礎, **42**, 11, 57 (1994).
- 5) 田淵健太, 川上 智, 白鳥寿一, 斎藤武士, 資源と素材, **113**, 1115 (1997).
- 6) 氏家正人, 松山明人, 第6回地下水・土壌汚染とその防止対策に関する研究集会講演集, p.237 (1998).
- 7) 下村達夫, 片岡直明, 北川政美, 関 直樹, 新村浩司, 谷口 紳, 第6回汚染土壌・地下水対策研究集会講演集, p.105 (1999).
- 8) 島辺賢一郎, 基礎工, **27**, 2, 57 (1999).
- 9) 田口信子, 川地 武, 第32回地盤工学研究発表会講演集, p.115 (1997).
- 10) 総理府, 厚生省「一般廃棄物および産業廃棄物の最終処分場に係る技術上の基準」(1998).
- 11) 環境庁, “土壌・地下水汚染に係わる調査・対策および運用基準”, p.62 (1999) 土壌環境センター.
- 12) 嘉門雅史, 第9回廃棄物学会研究発表会講演論文集, p.887 (1998).
- 13) 今村 聡, 李 昌洙, 根岸昌範, 下村雅則, 第33回地盤工学研究発表会講演集, p.245 (1998).
- 14) 久保 博, 川地 武, 松本 聡, 第33回地盤工学研究発表会講演集, p.251 (1998).