

プラスチックボードドレーンを用いた揚水・注水と酸化分解を併用した シアン含有地下水の原位置浄化工法 —豊洲新市場土壤汚染対策工事への適用—

鹿島建設(株) 正会員○瀬尾 昭治, フェロー会員 川端 淳一, 正会員 河合 達司,
正会員 永井 文男, 正会員 樋江井 夕紀夫, 正会員 小沢 明正,
牧内 崇志
錦城護謨(株) 小林 茂生

1. 目的

揚水井と注水井を組み合わせた揚水・注水工法は、清浄な水と汚染地下水を入れ替えることにより原位置で地下水を浄化する方法である。しかしながら、地盤の透水性や汚染の程度によっては、対策期間が長期化する場合がある。浄化期間を短縮する手法としては、①低透水地盤に対しても効率の良い揚水・注水システムの適用、②汚染物質の分解工法の併用 の二つが考えられる。①の手法として、プラスチックボードドレーン（写真-1参照）を用いる方法（以下ドレーン工法とする）を新規に考案した。また、②の手法として、汚染物質を酸化分解する過硫酸塩銀触媒法に着目した。

豊洲新市場土壤汚染対策工事（5街区）での汚染地下水対策では、シアン化合物とベンゼンによる地下水汚染を揚水・注水工法により工期内に浄化することが求められた。本報文では、ドレーン工法と過硫酸塩銀触媒法を工事に適用し、両工法の組み合わせによる促進効果により工期内の浄化を達成した事例を紹介する。

2. 地下水汚染の概要¹⁾

現場の地質断面図を図-1に示す。汚染地下水対策は施工基面の A.P.+2.0m盤から、第一不透水層である有楽町層 Yc 層 {粘性土（粘土・シルト）層} の上端（A.P. +0.8~-4.24m）までの帯水層（Hs 層）が対象である。帯水層の透水係数は $1.0 \times 10^{-4} \text{cm/s}$ 程度であり、平均層厚は3.86mである。地下水位は5街区の北西側から東京湾側に向かって緩やかに低くなっている。

豊洲新市場土壤汚染対策工事5街区は、敷地内を10m×10mに区切った単位区画毎に地下水質調査が実施され、単位区画1,261区画のうち、461区画で地下水汚染が確認された（表-1、図-2）。また、地下水の汚染物質は、ベンゼン、シアン化合物、砒素及びその化合物、鉛及びその化合物の4種類であり、地下水汚染の約9割はベンゼンとシアン化合物の汚染であった。

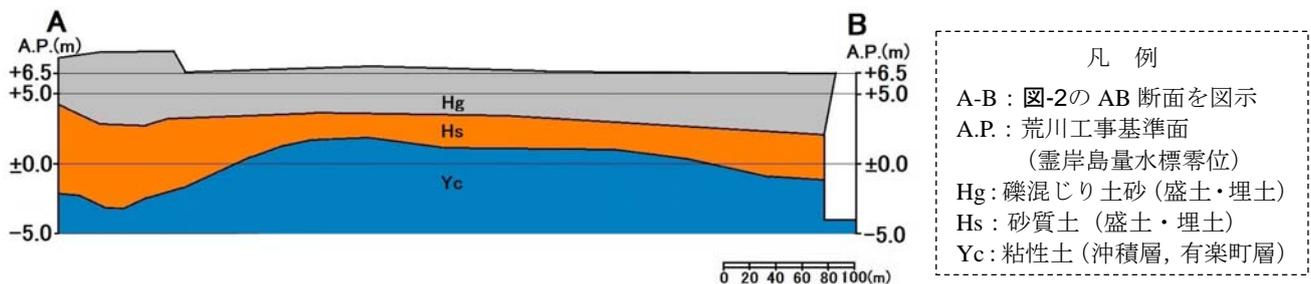


図-1 5街区での地質断面図

表-1 対象汚染物質の種類、基準超過区画数、地下水濃度最大値

| 汚染種類 | ベンゼン | シアン化合物 | 砒素及びその化合物 | 鉛及びその化合物 |
|----------------|------|--------|-----------|----------|
| 基準超過区画数 | 332 | 186 | 27 | 26 |
| 地下水濃度最大値(mg/L) | 13.0 | 6.6 | 0.31 | 0.08 |

キーワード 土壤汚染, 地下水汚染, 揚水・注水工法, 低透水性, ドレーン工法, 過硫酸

連絡先 〒182-0036 東京都調布市飛田給 2-19-1 鹿島建設株式会社 技術研究所 岩盤・地下水 Gr. TEL042-489-6647

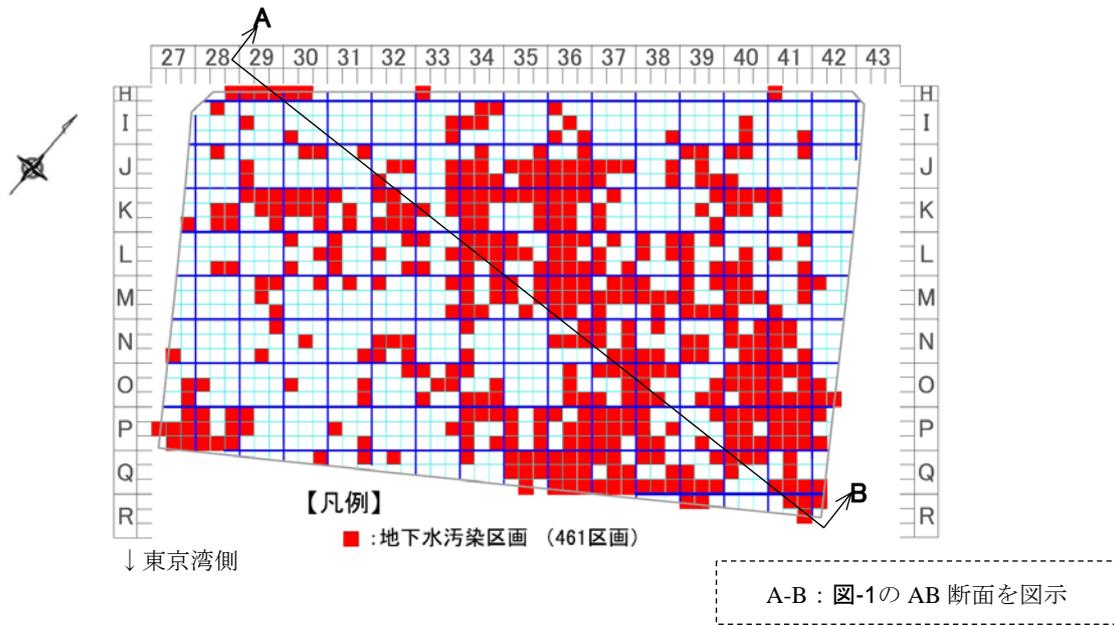


図-2 5 街区での地下水汚染状況

3. 汚染地下水対策工法の概要

(1) プラスチックボードドレーンによる揚水・注水工法

プラスチックボードドレーンは、厚さ4mm、幅94mm の薄いドレーン材（写真-1）であり、軟弱地盤の圧密を効果的に促進するために開発された真空圧密工法に用いられている。真空圧密工法では、プラスチックボードドレーンを軟弱地盤に多数打設し、地盤全体に負圧をかけて脱水・圧密促進するため、透水性の低い地盤であっても、効果的に脱水することができる。今回、汚染地下水対策として適用したドレーン工法は、揚水用のドレーンに真空ポンプで負圧（-70kPa～-80kPa 程度）を与え、注水用ドレーンには地盤上に設置した水タンクからの水圧を与えるシステム（写真-2）とした。また、より高い浄化効果が得られるよう、揚水及び注水ドレーンを各々約1m（ドレーン最短距離0.75m）の短い間隔で、千鳥配置となるように交互に打設した。これにより対象とする汚染区画のあらゆる場所に対して揚水ドレーンと注水ドレーンの組み合わせを作ることができ、10以上の高い動水勾配（通常の井戸工法では1/10程度以下）の1次元地下水流を千鳥格子状に与えることができることから、透水性の低い地盤であっても大きな揚水・注水量を確保することができる。なお、ドレーンの素材には、無害かつ生分解性の材料を用い、地盤内に残置しても分解される仕様とした。

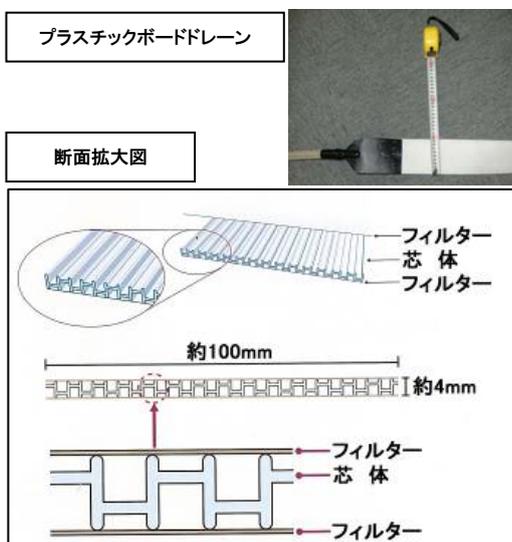


写真-1 プラスチックボードドレーン

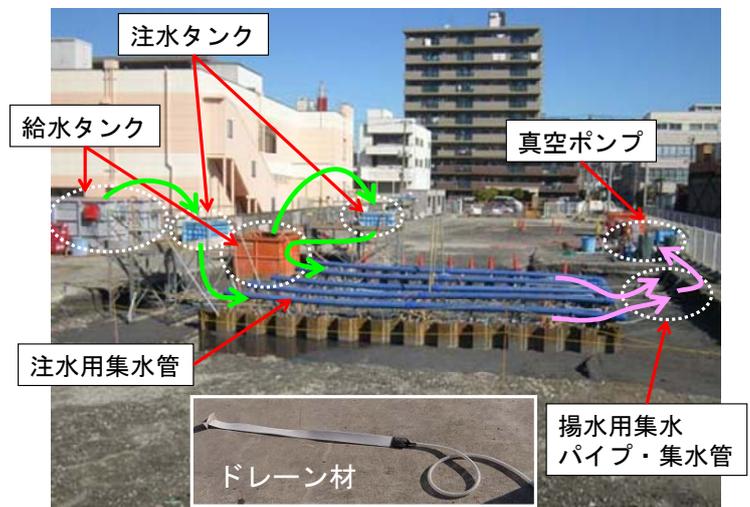


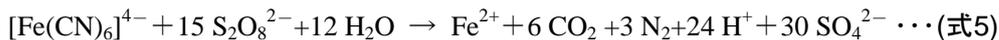
写真-2 ドレーン工法の適用状況
(非汚染サイトでの事前評価試験)

(2) シアン化合物の酸化分解法

シアン化合物のうち、遊離シアンは様々な酸化分解法により容易に分解できる。一方、重金属と結合した金属シアノ錯体は、解離定数が極めて小さく安定した化合物であるため、従来の分解法では十分な分解効果が得られない。地盤内のシアン化合物は、主に遊離シアンが土壌や地下水中で鉄と反応することで難分解性の鉄シアノ錯体（フェロシアン化イオン）として存在しているため、シアン化合物による汚染を原位置浄化するためには、この錯体を分解できる手法の開発が必要である。従来の酸化分解法ではフェロシアン化イオンの分解率が60%程度と十分ではないため、筆者らは過硫酸塩と銀触媒を用いる酸化分解法（以下、過硫酸塩銀触媒法とする）に着目した。本法では、過硫酸イオンが、銀触媒により活性化され、強力な酸化力を持つ硫酸ラジカル（ $\cdot\text{SO}_4^-$ ）が生成する(式1)。また、過硫酸塩の加水分解によりカル酸(式2)や過酸化水素(式3)が生成し、この過酸化水素が銀触媒と反応し酸化力の高いヒドロキシルラジカル（ $\cdot\text{OH}$ ）も生成する(式4)。本法では強力な二種類のラジカルが同時に生成するため、フェロシアン化イオンの分解率はほぼ100%である。



フェロシアン化イオンは、(式1)～(式4)で示した過硫酸塩から生じた強力な酸化物質の働きにより、最終的に二酸化炭素や窒素等に分解され、無害化される(式5)と考えている。



4. ドレーン工法による浄化性能評価試験

(1) ドレーン工法の揚水・注水特性事前評価試験

a) 試験方法

ドレーン工法の揚水・注水特性を確認するため、帯水層の透水係数が 10^{-3}cm/s 程度の細砂層である非汚染サイトにおいて、ドレーン工法の揚水・注水事前評価試験を実施した。縦横10m×10m、帯水層厚5mの区画に注水・揚水ドレーンを各々1m間隔の千鳥配置（最小間隔約75cm）で打設した（図-3）。注水には水道水を用い、ドレーン材に真空圧（実績最大値約-85kPa）と注水圧（地表面程度以上の固定水位）を作用させて揚水・注水を行った。ドレーン工法による揚水・注水特性は、揚水・注水量及び地下水中の塩化物イオン（初期濃度200mg/L程度）の濃度減衰により評価した。

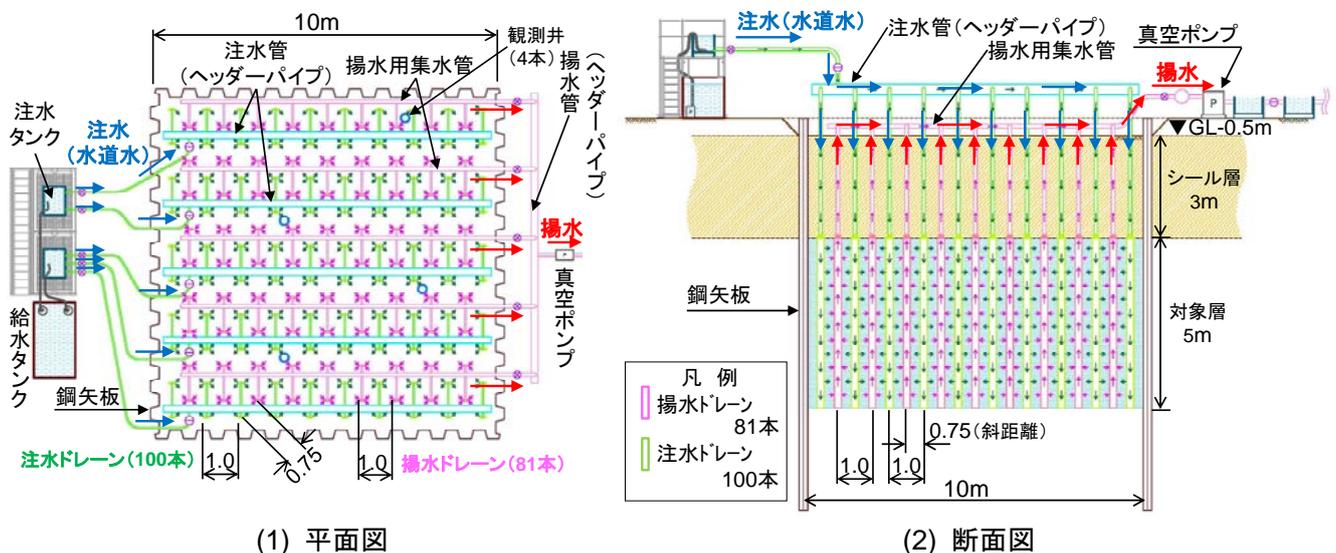


図-3 事前評価試験における揚水・注水ドレーン配置図

b) 試験結果

① 揚水・注水量

透水係数 10^{-3} cm/s 程度の細砂層の地盤において、揚水ドレーン81本、注水ドレーン100本で揚水・注水を実施したところ、揚水量と注水量ともに最大で110 L/min 程度の流量を確保できた。ドレーン工法では、従来の工法で確保できる揚水・注水量に比べて大きな揚水・注水量を確保できることがわかった。

② トレーサ（塩化物イオン）の減衰

揚水量及び注水量が平均約100L/min で揚水・注水を実施した際の、地下水中の塩化物イオン濃度の変化を、地下水の入れ替わり時間で整理した結果を図-4に示す。

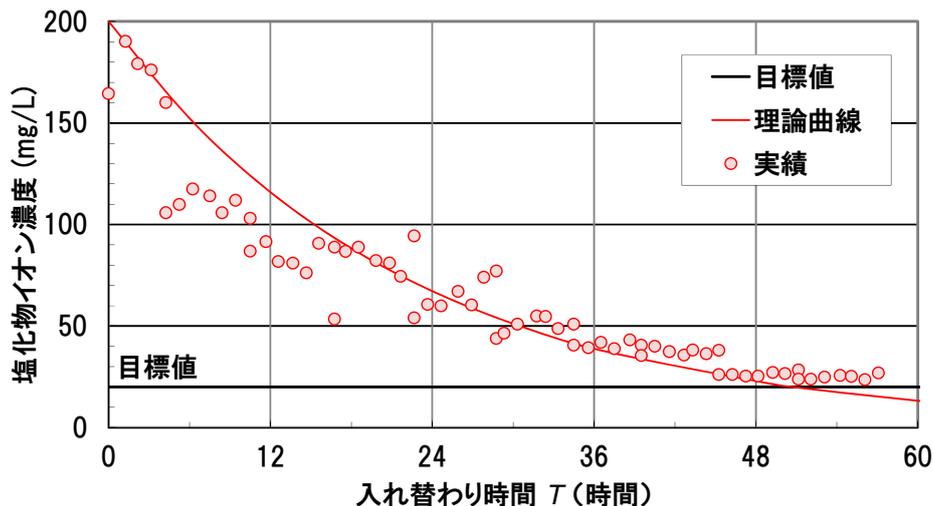


図-4 地下水中の塩化物イオン濃度の経時変化

図-4には、塩化物イオン濃度の実測値とともに、濃度減衰の理論曲線も示す。理論曲線は、入れ替え回数 N を X (塩化物イオン濃度/初期濃度(200mg/L)) と α (有効間隙率/間隙率) から求める(式6)と入れ替わり時間 T を入れ替え回数 N 及び自由水量、平均揚水・注水量から求める(式7)から算定した。

$$\text{入れ替え回数 } N = \log(1 - \alpha) X \quad \dots(\text{式6})$$

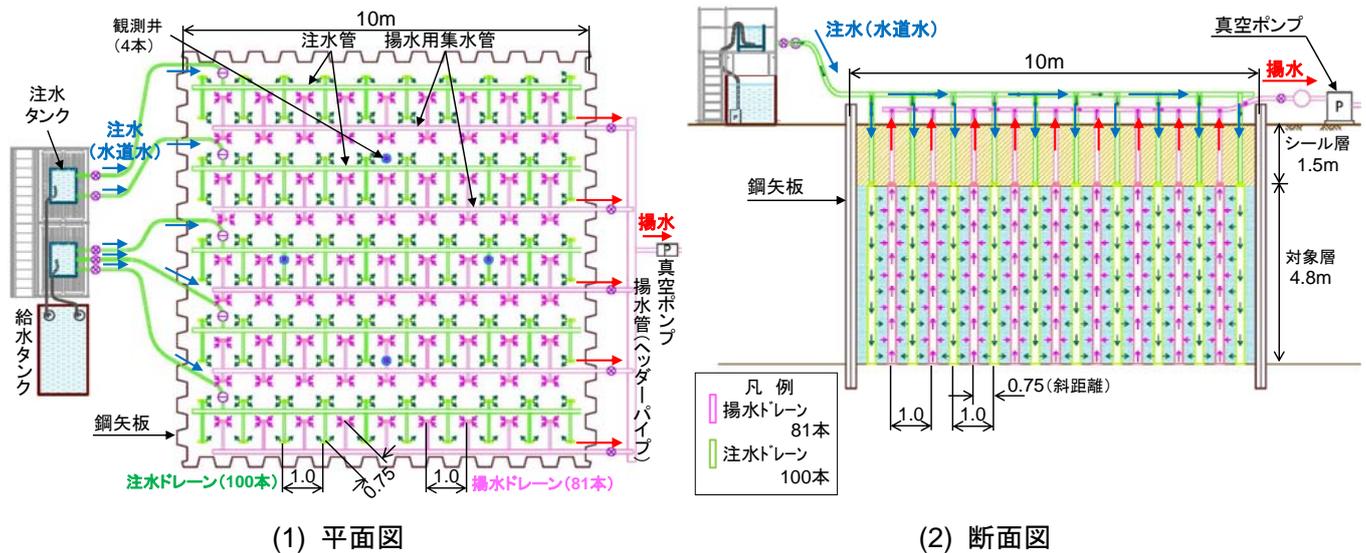
$$\text{入れ替わり時間 } T = N \times (\text{自由水量}) \div (\text{平均揚水} \cdot \text{注水量}) \quad \dots(\text{式7})$$

なお、当サイトの地盤の間隙率を細砂の一般的な値として間隙率35%、有効間隙率15%と仮定し、地下水量は 175m^3 、自由水量は 75m^3 、 $\alpha = 42.9\%$ から、(式6)及び(式7)を用いて塩化物イオンの減衰の理論曲線を算出した。地下水の入れ替わり時間と塩化物イオン濃度の変化は、実測値と理論曲線がほぼ一致した。これより、ドレーンによる揚水・注水時には注入水が極端に選択的な流路を通ることによる濃度低下の遅延はなく、かなり均質に入れ替わっているものと推定された。また、実測値と理論曲線がほぼ一致していることから、揚水・注水運転時の揚水量・注水量と地下水の初期汚染濃度を把握することで、浄化に要する期間をある程度正確に予測することが可能であることがわかった。

(2) 豊洲新市場土壤汚染対策（5街区）でのドレーン工法による浄化性能評価試験

a) 試験方法

豊洲新市場土壤汚染対策工事の5街区内に $10\text{m} \times 10\text{m}$ の試験区画を複数設けてドレーン工法を適用し、その浄化特性を評価した。各区画周囲には鋼矢板を、浄化対象の帯水層の下端まで打設した。帯水層はシルト質砂層で、層厚は約5m、透水係数は 10^{-4} cm/s 程度の低透水性地盤である。ドレーンの平面配置図を図-5に示す。ドレーンを181本設置し、これを揚水もしくは注水ドレーンとして使用した。試験ケースとして、ドレーンの数を「揚水用81本・注水用100本」と「揚水用100本・注水用81本」の2つのケースを設定し、両者の浄化性能を比較した。また、運転条件等から予測した揚水・注水量と実測値とを比較検討した。



(1) 平面図 (2) 断面図
 図-5 5街区での浄化性能評価試験における揚水・注水ドレーン配置図

b) 試験結果

① 注水・揚水量

揚水量及び注水量の経時変化を積算値で評価した結果を図-6、図-7に示す。通常、透水係数が 10^{-4} cm/sec程度の地盤であれば、揚水・注水量は、2~3 L/min (3~4 m³/日)程度であることが一般的である。これに対して、今回の試験ではドレーン工法により、透水係数が 10^{-4} cm/sec程度の地盤に対して、35~45 L/min (40~50 m³/日)程度の揚水量及び注水量を確保することが可能であった。また、揚水ドレーン及び注水ドレーンの本数によりわずかに効果が異なり、「揚水100本・注水81本」とした場合は「揚水81本・注水100本」よりも揚水・注水効果が高い傾向を示した。

② 揚水・注水量の予測値と実測値の比較評価

ドレーン工法による揚水・注水時の揚水量は、1次元地下水流として地下水が入れ替わるとモデル化して総揚水量を推定した。ドレーン材の仕様・間隔及び想定した地盤条件等を表-2に示す。この条件を用い、ダルシー則により揚水量を予測した(表-3)。

試験で得られた揚水量の実測値は、ダルシー則により算出した予測値と比較的よく一致した(表-4)。また、この試験ケースでは、揚水ドレーンには-70~-80kPa程度の負圧が、また注水ドレーンには+10kPa程度の注水圧がかかっていた。ドレーン間の動水勾配は、12近くにも達することから、大きな揚水・注水量を確保することが可能となったと考えられる。加えて、本工法においては、このような高い動水勾配の1次元的流れが区画内の全面に発生しており、より均質性の高い地下水の入れ替えが可能となっていると考えられる。

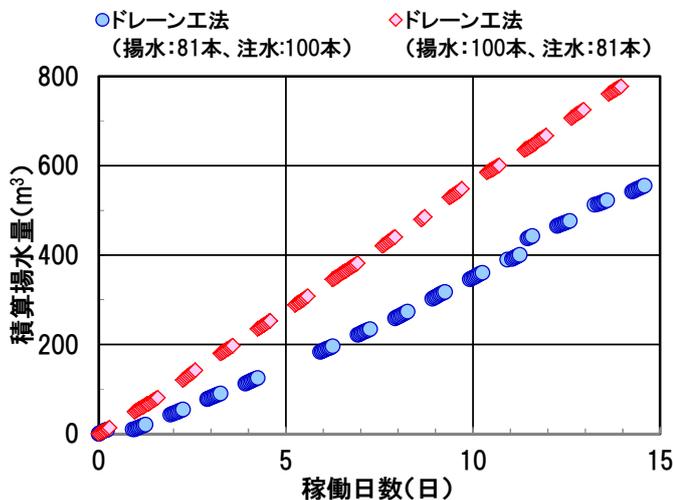


図-6 積算揚水量

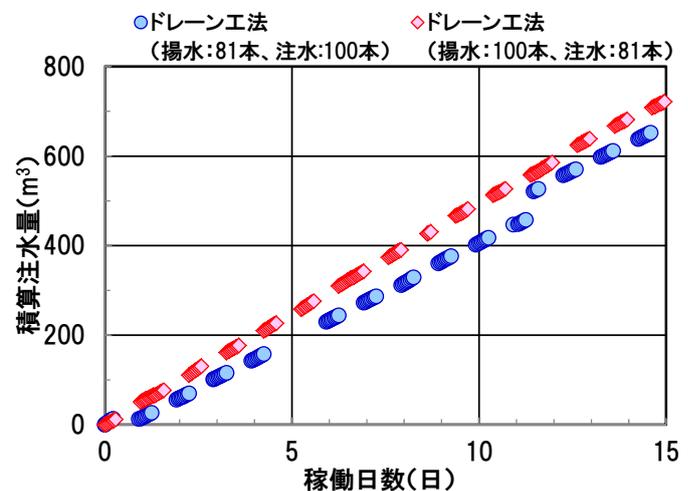


図-7 積算注水量

表-2 揚水量算出の条件一覧

| | | |
|-------------------|-----------------|-----------------------------|
| ドレーン形状 (1本あたり) | 全体の通水長:a | 74 (mm) |
| | ドレーン長:b | 4.47 (m) |
| | 有効通水面積: A=ab | 0.33 (m ²) |
| ドレーン間隔 : r | | 0.75 (m) |
| 想定水頭差:ΔH | | 14.5 (m) |
| 揚水ドレーン本数 | | 81 (本) |
| | | 100 (本) |
| 想定透水係数 : k | | 1.0×10 ⁻⁴ (cm/s) |

表-3 ダルシー則による揚水量の予測値算出

| | |
|-------------------------------|--|
| 揚水・注水ドレーン間 動水勾配 : i | $i = \Delta H / r = 19.3$ |
| ドレーン間流速 : v | $v = ki = 1.93 \times 10^{-5} (\text{cm/s})$ |
| 揚水・注水量 : q | $q = vA = 6.40 \times 10^{-6} (\text{m}^3/\text{s})$ $= 0.553 (\text{m}^3/\text{day}/\text{本})$ |
| 81本での総揚水量 : Q ₈₁ | $Q_{81} = 0.553 \times 81$ $= 44.8 (\text{m}^3/\text{day})$ |
| 100本での総揚水量 : Q ₁₀₀ | $Q_{100} = 0.553 \times 100$ $= 55.3 (\text{m}^3/\text{day})$ |

表-4 揚水量の予測値及び実測値

| 試験ケース | 総揚水量 (m ³ /day) | |
|---------------------|----------------------------|-----|
| | 予測値 | 実測値 |
| 揚水 81 本 注水 100 本 | 44.8 | 40 |
| 揚水 100 本 注水 81 本 | 55.3 | 55 |

表-5 酸化剤浸漬後のヒ素及び鉛の土壌溶出量

| 項目 | 溶出量 (mg/L) |
|----|------------|
| ヒ素 | < 0.005 |
| 鉛 | < 0.005 |

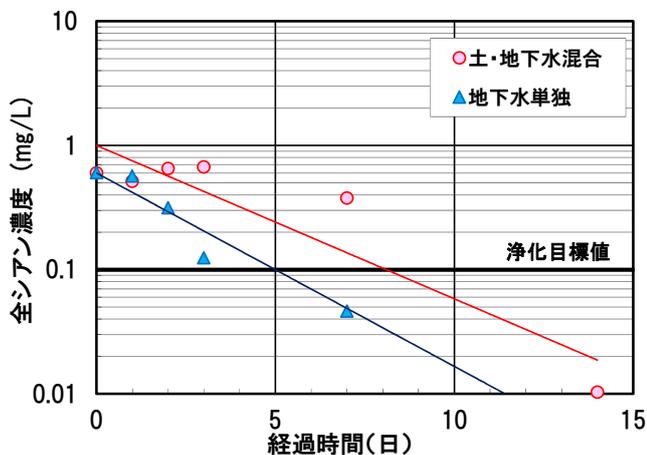


図-8 室内適用性試験での全シアン濃度の経時変化

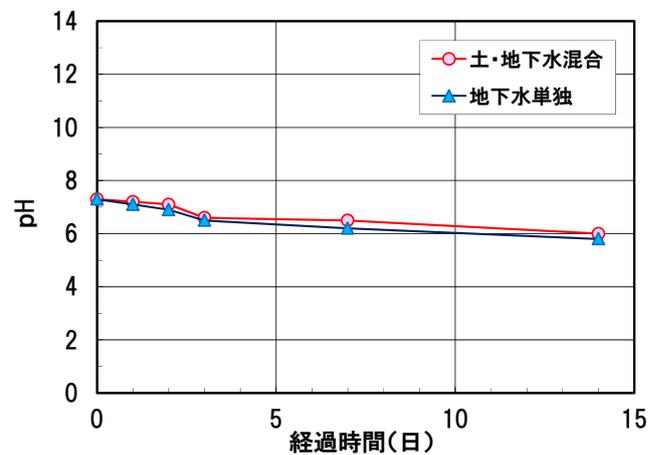


図-9 室内適用性試験での pH の経時変化

5. 過硫酸塩銀触媒法による浄化性能評価試験

(1) 過硫酸塩銀触媒法の室内適用性試験

a) 試験方法

過硫酸塩銀触媒法の現場適用にあたり、5街区の地下水汚染区画から採取した土壌及び地下水試料を用いた室内適用性試験を実施した。試験ケースとして、土壌と地下水を混合したケースと地下水のみのケースで評価した。過硫酸塩として過硫酸ナトリウムを用い、採取した汚染土壌試料に過硫酸塩及び銀触媒を含む酸化剤（以下酸化剤とする）と pH 緩衝溶液を500 mL ポリエチレン瓶内で混合した。暗所、室温にて14日間養生し、1日、2日、3日、7日、14 日後に試料を採取し、フィルター濾過後、溶液の全シアン濃度と pH を計測した。また、対象土壌は、底質調査法の全含有量試験によりヒ素が11 mg/kg、鉛が15 mg/kg 検出され、微量ではあるが鉛とヒ素を含有していた。過硫酸法を実施することにより、ヒ素と鉛の溶出を促進する可能性があるかを評価するため、90日間酸化剤に浸漬した後の土壌の溶出量を評価した。

b) 試験結果

室内試験における全シアン濃度及び pH の経時変化をそれぞれ図-8、図-9に示す。過硫酸塩銀触媒法によるシアン化合物の分解反応を一次反応とすると、一次反応係数 k は土・地下水混合のケースで-0.29(/日)、地下水単独のケースで-0.36(/日)であった。初期値約0.6 mg/L の全シアン濃度は、土・地下水混合のケースでは約

8日、地下水単独のケースでは約5日で浄化目標値に達した。なお、土・地下水混合のケースでは、地下水単独のケースよりも全シアン濃度の低減速度が遅くなったが、これは土壤中により多く含まれる有機物や還元性鉄などの還元性物質の影響により過硫酸塩が消費された可能性が考えられる。また、pHは5.8～8.6の中性域に維持された。これにより、過硫酸塩の分解に伴う酸性化は、pH緩衝溶液の添加により低減でき、pHを中性域に維持しながら、全シアン濃度の低下が可能であることを確認した。さらに、酸化剤に90日間浸漬した土壌のヒ素と鉛の溶出量は、ともに土壌溶出量基準に適合し、検出下限値以下であった(表-5)。したがって、酸化剤の地盤への注入により、土壌から鉛とヒ素の溶出が促進されることはないと考えられる。

(2) 豊洲新市場土壌汚染対策5街区での過硫酸塩銀触媒法による浄化促進効果実証試験

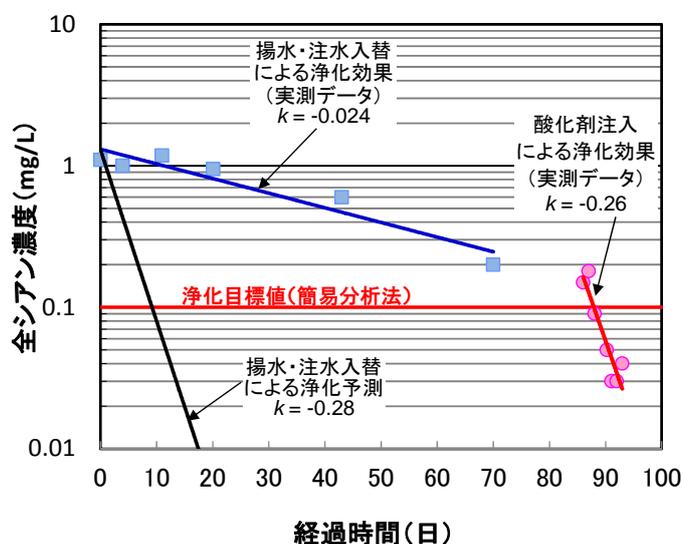
a) 試験方法

シアン化合物の汚染地下水が存在する試験区画において、ドレーン工法による揚水・注水を実施したのちに過硫酸塩銀触媒法を実施し、浄化の促進効果を評価した。試験のケースとして、まず揚水と水道水を注水した(揚水・注水試験ケース)。その後、注水ラインからの供給水を酸化剤とpH緩衝溶液に切替え、それらを一定量注入した後に注入を停止した(酸化剤試験ケース)。試験中には地下水を採取し、全シアン濃度及び酸化還元電位(ORP)の経時変化を測定した。また、酸化剤非適用区画(ドレーン工法のみ適用した区画)と適用区画の観測井(各々2箇所)で浄化対策前後における地下水のpHを測定し、酸化剤適用によるpHへの影響を比較検討した。

b) 試験結果

① 全シアン濃度

実証試験における全シアン濃度の経時変化を図-10に示す。また、酸化剤を用いず揚水・注水のみで対策を行った場合の全シアン濃度の予測値を、実証試験での平均揚水量(35.2 m³/日)を用い、図-10中に示した(式8)、(式9)より速度係数 k の予測値-0.28 (/日)を算出した。揚水・注水試験ケースでは、全シアン濃度の低減は認められたが、その速度係数 k は-0.024 (/日)と緩慢であり、予測値よりも約10倍遅かった。これはシアン化合物の一部が土に吸着すること、または一部にマイクロレベルの流動場の不均質性が存在することによる遅延効果であると考えられる。一方、酸化剤注入後の全シアン濃度低下の速度係数 k が-0.26(/日)と酸化剤注入により浄化速度が加速することを確認した。また、この値は、前述の室内適用性試験での土壌・地下水混合ケースとほぼ同じであった。以上より揚水・注水工法による地下水の入れ替えと酸化分解を併用することで浄化期間の大幅な短縮が可能であることが実証された。



【揚水・注水の予測値】

・区画内の帯水層体積 V を480 m³、土壌間隙率 n を35%、有効間隙率 n_e を15%、初期全シアン濃度 C_0 を1.1 mg/Lとし、地下水の総入れ替え揚水量 Q m³における全シアン濃度 C を(式8)で表せるとしたもので、有効間隙のみの地下水が入れ替わり帯水層内の汚染地下水が希釈・浄化されると仮定した。

$$C = C_0 \times \left(1 - \frac{n_e \times V}{n \times V}\right)^{\left(\frac{Q}{n_e \times V}\right)} = 1.1 \times 0.57^{\left(\frac{Q}{72}\right)} \dots (\text{式8})$$

・全シアン濃度の変化は、(式9)の一次反応式 (t : 経過時間(日)、 k : 速度係数(/日))で近似できると仮定し、その速度は速度係数 k の大きさを評価した。

$$\frac{\partial C}{\partial t} = -kC \dots (\text{式9})$$

図-10 実証試験での全シアン濃度の経時変化及び予測値

② 酸化還元電位

酸化剤注入区画の酸化還元電位（ORP）の経時変化を図-11に示す。ORP の値は、酸化剤注入直後から急激に上昇し、注入完了以降は徐々に減少し、注入開始後20日程度で初期値まで低下した。一方、酸化剤による全シアン濃度の低下は2週間～1ヶ月程度の期間で見られた。シアン化合物の分解時期と ORP が初期値よりも高い時期がほぼ一致していることから、ORP は酸化剤によるシアン化合物の分解効果の持続性を評価でき、現場における酸化剤再注入の時期等についてより合理的な判断が出来るものと期待される。また、酸化剤による環境影響として、酸化剤による ORP の上昇は一時的なものであり、約1か月後に元の ORP に戻ることが確認された。

③ pH

酸化剤適用区画と非適用区画の対策前後の地下水 pH を測定した結果を図-12に示す。酸化剤適用区画の観測井①・②及び非適用区画の観測井③・④ともに、対策後の地下水 pH は中性域（5.8～8.6）であった。このことから過硫酸法適用時に pH 緩衝剤を用いることで、地下水 pH を中性域に維持できることが確認された。

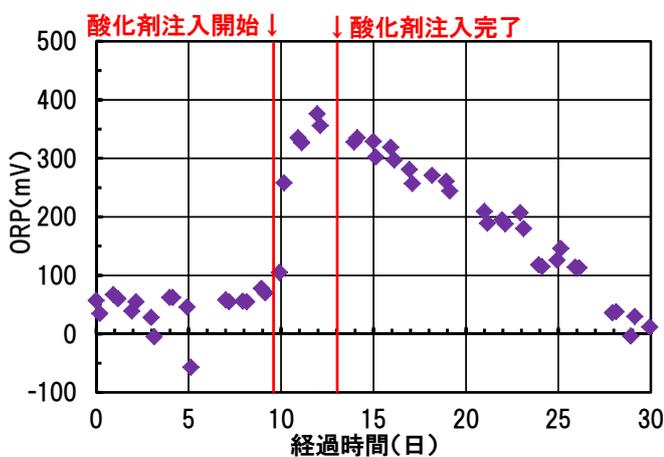


図-11 実証試験での ORP の経時変化

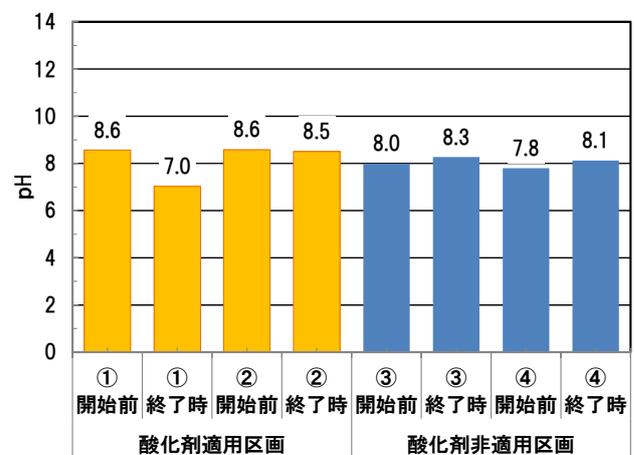


図-12 地下水浄化対策前後の pH 変化

6. 豊洲新市場土壌汚染対策工事（5 街区）への適用

豊洲新市場土壌汚染対策工事(5街区)に対して、ドレーン工法と過硫酸塩銀触媒法を適用した。ドレーン工法は、地下水汚染区画461区画中146区画（総施工面積は14,600m²）に対して施工し、全ドレーン長は86,997mに達した。また、地下水汚染区画のうち比較的濃度の高いシアン化合物による地下水汚染が認められた71区画に対して、過硫酸塩銀触媒法を適用した。ドレーン工法と過硫酸塩銀触媒法を適用することにより、工期内にすべての地下水汚染区画を基準以下に低減することができた。

7. まとめ

ドレーン工法は細かいピッチで打設でき、ドレーン材の全面で揚水・注水できることから、対象地内の地下水をより均質に入れ替えできる方法である。豊洲新市場土壌汚染対策工事（5街区）に適用し、透水係数1.0×10⁻⁴cm/s 程度の低透水性地盤においても、大きな流量を確保でき、低透水地盤での浄化工法として有用であることが確認された。また、過硫酸塩銀触媒法を適用することで、浄化期間を飛躍的に短縮することができた。また、これに伴う重金属の溶出や ORP、pH の環境影響は生じなかった。これらの方法を組み合わせて5街区の461区画の大規模な地下水汚染対策に適用し、工期内でのシアン化合物による地下水汚染の浄化を実現することができた。

参考資料

- 1) 東京都中央卸売市場：豊洲新市場予定地における土壌汚染対策等に関する専門家会議 報告書，2008.