

シールド工事での中性酸化剤による VOC汚染土の浄化

伊藤 圭二郎¹・川端 淳一¹・河合 達司¹・大島 博²・滝本 邦彦³

¹正会員 鹿島建設株式会社 技術研究所 (〒182-0036 東京都調布市飛田給2-19-1)

E-mail:itoukei@kajima.com

²正会員 鹿島建設株式会社 中部支店 (〒460-0004 名古屋市中区新栄町2-14)

³正会員 鹿島建設株式会社 土木管理本部 (〒107-8348 東京都港区赤坂6-5-11 鹿島赤坂別館)

本工事は泥土圧シールド工事であり、掘進区間の一部に工場で洗浄剤として使用されていたトリクロロエチレン（以下、TCE）等のVOC（揮発性有機化合物）による土壌・地下水汚染がある。この土壌・地下水汚染区間は約350 mあり、マイルドフェントン法と呼ばれるpHが中性で酸化分解できる技術により、掘進しながら掘削土中のTCEを浄化した。工事の結果、浄化後の掘削土は全て環境基準値以下であり、本手法の有効性が確認できたのでその内容について報告する。

Key Words : shield tunnel, remediation, contaminated soil, neutral oxidant

1. はじめに

本工事は、掘削外径Φ7440 mm、セグメント内径Φ6700 mm、全長約3 kmの泥土圧シールド工事である。掘進する区間の一部には、工場で洗浄剤として使用されていたトリクロロエチレン、及びその地盤中での自然分解により生成するシス-1,2-ジクロロエチレン（以下cDCE）による約350 mの土壌・地下水汚染区間がある。TCEやcDCEは揮発性の有害物質であり、掘進に伴い排出される掘削土から揮発して拡散し、作業環境の悪化、さらには工事周辺環境の悪化につながる恐れがあった。このため、掘削土に酸化剤を混合して、トンネル内でTCEやcDCEを酸化分解し、無害な二酸化炭素等に分解

しながら掘進する手法を適用した。

2. 施工方法

浄化しながら掘進する施工方法を図-1に示す。酸化剤は、中性で酸化分解できる特長を有するマイルドフェントン法¹⁾を採用しており、地上プラントにてその薬剤である過酸化水素水と触媒をタンクにて貯留する。坑内には配管輸送し、坑内の台車上のタンクに貯留する。台車をバッテリーロコにて切羽へ輸送し、シールド機の後続台車に設置した注入ポンプと台車上のタンクを接続する。シールド掘進と同時にポンプにより切羽または二次スク

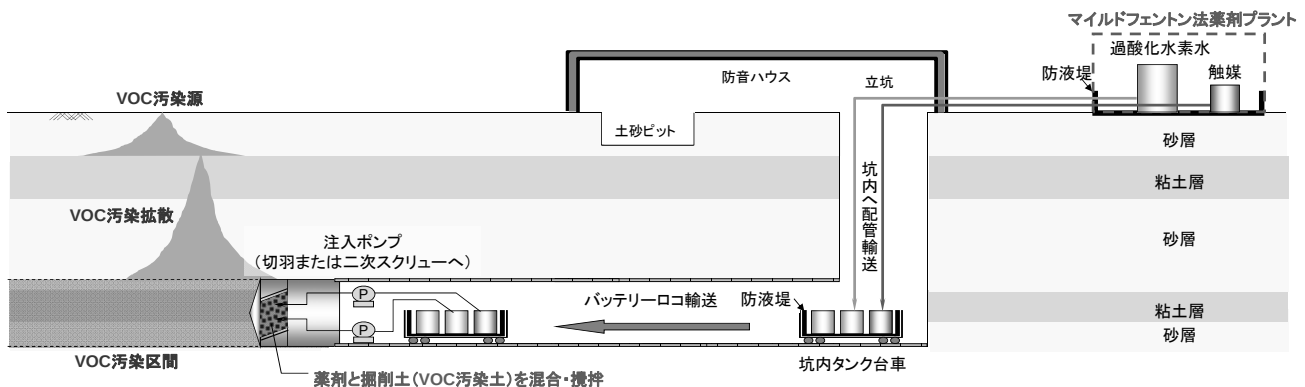


図-1 浄化対策の概要

リューへ薬剤を注入する。これにより、掘削土にはマイルドフェントン薬剤が混合され、混合直後からTCEやcDCEの分解が進む。その後、二次スクリーから排出された掘削土は、ベルトコンベアで搬送し、掘削土貯留タンク（図-6参照）に一時的に貯留する。現場でのTCEとcDCEの分析により浄化が確認されてから、掘削土貯留タンクから地上の土砂ピットまでベルトコンベアで搬送する。

一連の手順での特徴は、腐食性の液体で人体に有害である過酸化水素水と触媒を、坑内で台車上のタンクにて輸送したことである。一般にはシールドで使用する材料は配管を設置してポンプにより輸送するのが通常であるが、表-1のとおり両者を比較すると、タンク輸送の方が安全性が高いと判断して採用した。

3. 浄化原理と薬剤混合量の設計

(1) 浄化原理

浄化原理としてマイルドフェントン法の酸化反応を図-2に示す。過酸化水素水は、触媒である鉄イオンを混合すると、フリーラジカルが発生して激しい酸化反応が進む。この反応はフェントン反応と呼ばれている。一般に普及しているフェントン反応は、触媒の役割を果たす鉄イオンが中性で析出し易く触媒の機能を果たさなくなるため、酸性にして反応させるものがほとんどである。しかしながら、今回の浄化対象は土であり、土を酸性にすると土の中に微量存在する有害な重金属（例えば、鉛やカドミウムなど）の溶出が高まって、環境に悪影響を及ぼしたり、産廃コストの増大を招いたりする可能性がある。また、掘削土の搬送設備も全て耐酸性設備にする必要があるため、設備コストの増大にもつながる。一方で

マイルドフェントン法では、特殊添加剤を混合することで、中性でも鉄イオンの状態を維持し、触媒として機能させる手法である。重金属を溶出するリスクは非常に小さく、中性であるため安全性も比較的高く、設備等への負荷を大幅に低減できるメリットがある。

フリーラジカルが発生した後の反応は、強力な酸化力によりTCEやcDCEが酸化分解され、水、二酸化炭素、塩化物イオンの無害な物質になる。また、使用する薬剤である過酸化水素水、鉄イオン、特殊添加剤も、酸素、水、二酸化炭素、鉄イオンとなり、薬剤による2次汚染の懸念もない手法である。

(2) 薬剤混合量の設計

現場の土壤試料を用いて室内試験を行い、薬剤混合量の設計を行った。室内試験は、土壤試料を現場の汚染濃度を想定して環境基準値の10倍程度のTCEおよびcDCE濃度に調整し、過酸化水素水を所定の濃度で配合し、触媒は過酸化水素水に対して一定の割合で加え、分解効果を評価した。

試験結果を図-3、4に示す。どちらの試験でも、過酸化水素水の濃度に応じて分解効果が高まる結果となつて

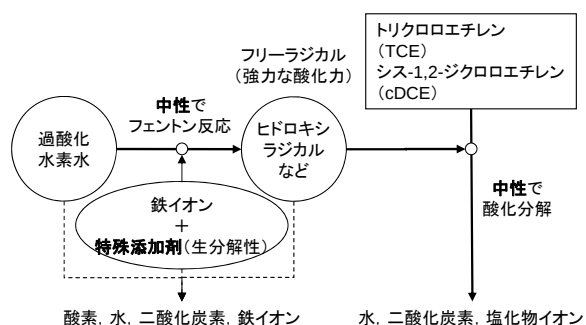


図-2 マイルドフェントン法の酸化反応

表-1 薬品の輸送方式による比較

	配管方式	タンク台車方式
方法	- 掘進と共に配管延長（約1.6km） - 地上タンクから掘削土へ注入	- 立抗下で地上タンクからタンク台車に配管輸送 - シールド機後続台車までバッテリーロコで輸送 - 後続台車上のポンプから掘削土へ注入
想定される漏洩箇所	- 配管接合部（無人、1.5km前後） - 配管延伸作業時	- 台車タンク搬送時 - 立抗下配管または後続台車上ポンプとの接続部
漏洩対策	- 耐薬品性の配管（SUS製） - 日常点検 - バルブ開閉手順の遵守、など	- 耐薬品性のタンク（ポリエチレン製） - タンクの固定や防液堤の設置 - 工事担当者による監視
長所	タンク台車と比べてバッテリーロコ輸送がないため施工サイクルが短縮できる。	全ての作業で工事担当者が監視して漏洩有無の確認ができる。
短所	約1.5 kmの配管輸送においては、ほとんど人の監視が行き届かない。	タンク台車を立抗下で補給したり切羽へ輸送したりするので施工サイクルが長くなる。
結論	配管方式では漏洩に気づかないため過酸化水素水が大量に漏洩する恐れがあるが、タンク台車方式なら工事担当者がポンプ停止等の処置を迅速にでき、災害を最小限に抑えられる。	

いる。TCEもcDCEも環境基準値以下となるのは、30分では1%以上、60分では0.5%以上、120分でも0.5%以上が必要である。現場での施工サイクルを考慮すると、掘進と組み立てで60分程度要することから、60分で浄化できれば十分と判断して0.5%の配合とした。

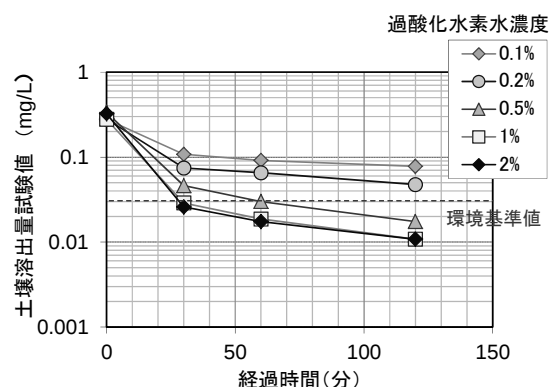


図-3 TCE分解試験結果

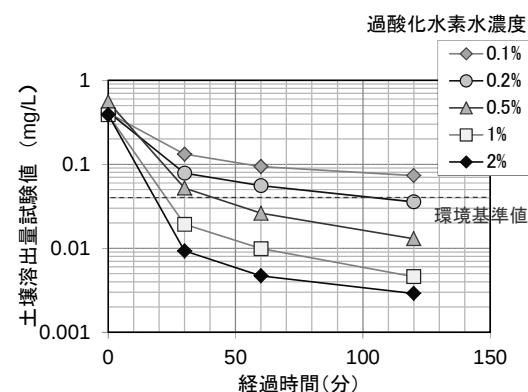


図-4 cDCE分解試験結果

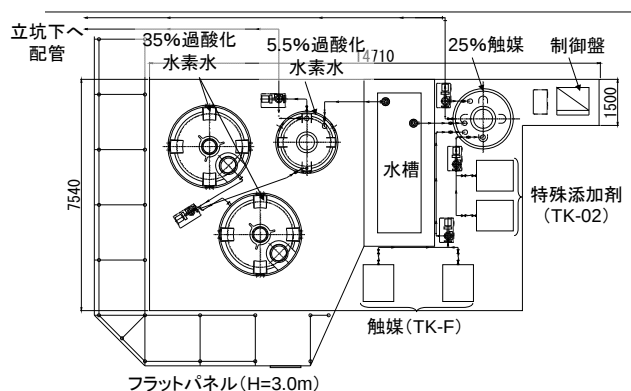


図-5 地上プラント平面配置

4. 施工設備

(1) 地上プラント

マイルドフェントン法で使用する過酸化水素水と触媒を貯留する地上プラントの平面配置を図-5に示す。過酸化水素水は工業用に生産されている35%濃度のものを搬入し、15 m³タンク2基にて貯留した。使用時には安全面に配慮して、5.5%に希釈して10 m³タンクに貯留し、立坑下のタンク台車へ輸送した。

触媒（商品名：TK-F、三菱ガス化学）と特種添加剤（商品名：TK-02、三菱ガス化学）については、1 m³コンテナでそれぞれ搬入し、両者を混合しても化学的に安定している25%に希釈して坑内で使用した。

(2) 坑内輸送用タンク台車

坑内輸送用タンク台車を写真-1に示す。タンクの材質は薬品への耐性のあるポリエチレン製とし、使用量を考慮して1.5 m³×6基を5.5%過酸化水素水に、1 m³×1基を25%触媒に使用した。また、万一の漏水に備えてタンクを防液堤で囲んだ設備とした。

(3) 注入設備（シールド機後続台車）

注入設備は、図-6のとおりシールド機後続台車（5番目）に設置し、過酸化水素水（図中H₂O₂）と触媒注入用のポンプや、流量制御のための設備を準備した。



写真-1 坑内輸送用タンク台車

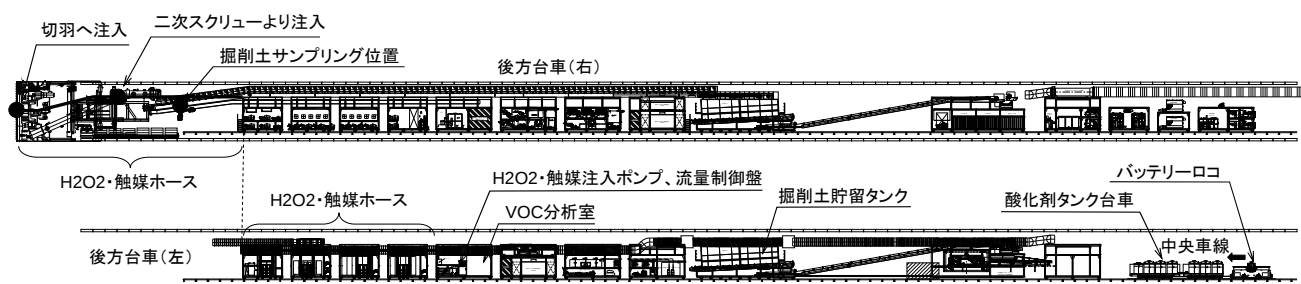


図-6 浄化対策の概要

流量については写真-2のとおり、流量計からの信号により自動でバルブ調整し、設定流量となるように制御できる設備とした。

注入用のポンプは、写真-3のとおり過酸化水素水用と触媒用に各1台ずつ設置し、掘進時にはタンク台車と接続して注入する設備とした。

(4) 分析室（シールド機後続台車）

シールド機後方台車（5番目）にVOC分析室を用意し、ガスクロマトグラフを設置してTCEやcDCEの土壌溶出試験を現場で5分で行った。分析頻度は、1リングごとに図-6に示す二次スクリー出口より採取した掘削土に対して、浄化管理値以下を確認できるまで行うこと（65 m³に1回の頻度）とした。

現場分析での浄化管理値は、事前に公定分析（環境庁告示46号溶出試験）との相関をとることで、TCEやcDCEの環境基準値の約80％に設定した。

5. 対策範囲と結果

(1) 対策範囲

対策範囲の平面図を図-7に示す。本工事以前に行われた地下水中のTCEおよびcDCEの調査結果（図中の黒丸：全て環境基準値超過）を参考に、トンネル区間上でボーリング調査（図中の白丸）を行い、基準値以下であったことから、対策範囲を約350 m、組み立てリング数にすると224リング（1リング1.5 m）とした。

(2) 浄化効果

対策後の掘削土のTCEとcDCEの1リングごとの分析結果を図-8、9にそれぞれ示す。TCEもcDCEもほとんどの場合は検出されていない（0.001 mg/L未満）結果であり、検出されていても浄化管理値以下に収まっている結果を得ている。検出されていない結果が多いことについては、マイルドフェントン法による浄化効果に加えて、環境基準値を大きく超えるような高濃度の汚染がなかったこと

も一因と考えられる。

(3) 2次汚染への影響

マイルドフェントン法による2次汚染への影響について確認するため、薬剤注入を始めた1リング目の掘削土に対して、環境基準値に指定されている26物質の分析を行った。その結果を表-2に示す。全項目で基準値以下であり、2次汚染の影響もないことを確認した。

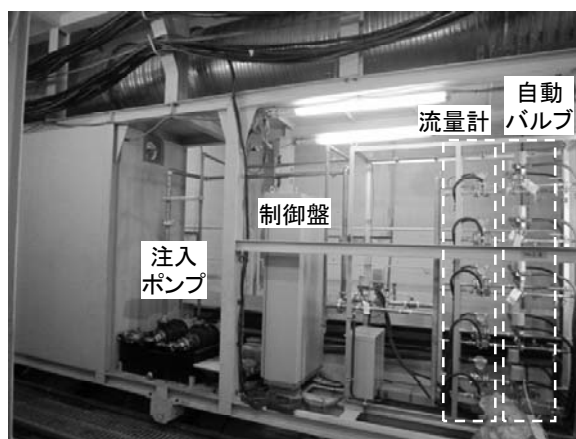


写真-2 注入設備（シールド機後続台車）



写真-3 タンク台車と注入ポンプの接続状況

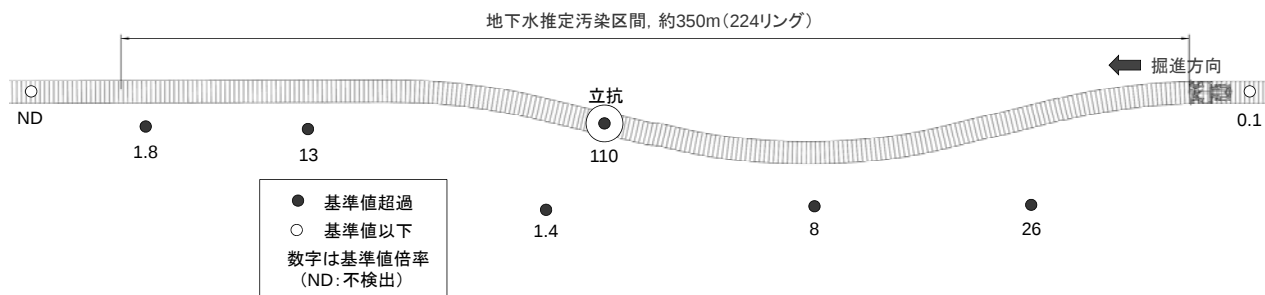


図-7 対策範囲平面

表-2 対策後の土壌の26項目土壌溶出試験結果

項目	単位	分析結果	環境基準値
ガドミウム及びその化合物	(mg/L)	0.001未満	0.01
六価クロム化合物	(mg/L)	0.01未満	0.05
シアン化合物	(mg/L)	不検出 (0.1未満)	検出されないこと
水銀及びその化合物	(mg/L)	0.0005未満	0.0005
アルキル水銀	(mg/L)	不検出 (0.0005未満)	検出されないこと
セレン及びその化合物	(mg/L)	0.002未満	0.01
鉛及びその化合物	(mg/L)	0.005未満	0.01
砒素及びその化合物	(mg/L)	0.005未満	0.01
ふっ素及びその化合物	(mg/L)	0.09	0.8
ほう素及びその化合物	(mg/L)	0.03	1
シマジン	(mg/L)	0.0003未満	0.003
チオベンカルブ	(mg/L)	0.002未満	0.02
チウラム	(mg/L)	0.0006未満	0.006
ポリ塩化ビフェニル	(mg/L)	不検出 (0.0005未満)	検出されないこと
有機りん化合物	(mg/L)	不検出 (0.1未満)	検出されないこと
四塩化炭素	(mg/L)	0.0002未満	0.002
1,2-ジクロロエタン	(mg/L)	0.0004未満	0.004
1,1-ジクロロエチレン	(mg/L)	0.002未満	0.02
シス-1,2-ジクロロエチレン	(mg/L)	0.004未満	0.04
1,3-ジクロロプロペン	(mg/L)	0.0002未満	0.002
ジクロロメタン	(mg/L)	0.002未満	0.02
テトラクロロエチレン	(mg/L)	0.0005未満	0.01
1,1,1-トリクロロエタン	(mg/L)	0.0005未満	1
1,1,2-トリクロロエタン	(mg/L)	0.0006未満	0.006
トリクロロエチレン	(mg/L)	0.002未満	0.03
ベンゼン	(mg/L)	0.001未満	0.01

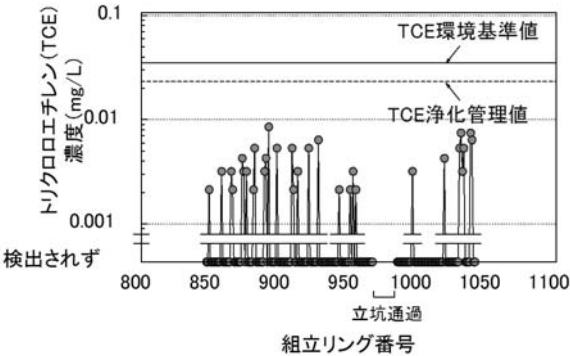


図-8 TCE 濃度の分析結果

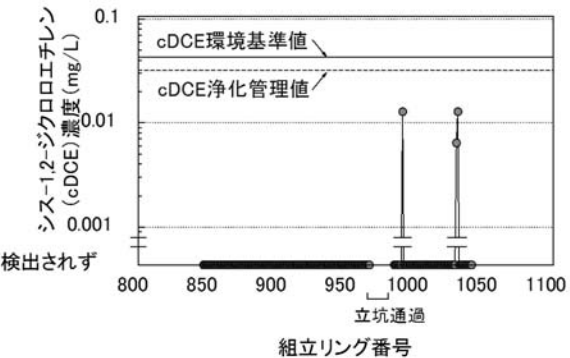


図-9 cDCE 濃度の分析結果

(4) 施工サイクルへの影響

施工サイクルについて、計画時のものと実施工のものを表-3、4にそれぞれ示す。計画時は、掘進完了からの浄化時間を安全をみて90分（掘進開始から120分）と見込んでいたが、チャンバー内の滞留時間20分程度のみで前述のとおり環境基準値以下の結果を得た。一方で、2章の施工方法で記載したとおり、薬品をタンク台車方式で輸送したため、早期に環境基準値以下の確認ができて、セグメント搬送に加えて薬品台車の輸送時間があり、計画より大幅に短縮することはできなかった。タンク台車方式にしたことは安全を最優先にした意味で有効だったと考えているが、施工サイクル改善のためには切羽近くで複線にするなどのさらなる工夫が必要だと考えられる。

6. まとめ

揮発性の有害物質を含む地盤において、掘削土にマイルドフェントン法薬剤を混合してシールド機内で酸化分解し、二酸化炭素等は無害化しながら掘進する手法を適用した。その結果、全ての分析値が浄化管理値以下となり、作業環境の悪化、さらには工事周辺環境の悪化を防止しつつ掘進を行うことができた。

また、施工においてはマイルドフェントン法薬剤が腐

表-3 計画時の施工サイクル

[分]	0	30	60	90	120
掘進					
組み立て					
浄化養生					
セグメント輸送			立抗下→切羽→立抗下		
薬品注入					
タンク台車輸送		切羽→立抗下		立抗下→切羽	

表-4 実際の施工サイクル

[分]	0	30	60	90	120
掘進					
組み立て					
浄化養生					
セグメント輸送			立抗下→切羽→立抗下		
薬品注入					
タンク台車輸送		切羽→立抗下		立抗下→切羽	

食性の液体であることから、災害防止のため坑内輸送は台車タンクをバッテリーロコで輸送する方式とした。この結果、大きな漏洩事故や災害はなく、安全に施工を進めることができた。

参考文献

1) 仲山賢治, 川端淳一, 永井文男, 君塚健一, 海老原孝: マイルドフェントン法 ―ジェットブレンド工法による原位置浄化技術―, 基礎工, Vo.37, No.11, pp.51-53, 2009.

(2013.9.2 受付)

REMEDIATION OF CONTAMINATED SOIL USING MILD FENTON TECHNOLOGY IN SHIELD TUNNEL METHOD

Keijiro ITO, Junichi KAWABATA, Tatsuji KAWAI, Hiroshi OHSHIMA,
Kunihiko TAKIMOTO

This construction is a muddy soil pressure balanced shield method with a section of contaminated soils by trichloroethylene which had been used in the factory, a longest of which is about 350 m. We used a unique oxidation technology called “Mild fenton method” which can break TCE into harmless compounds neutrally. All the results were below environmental standard value and suggested our plan was effective.