

38. 真空ポンプを利用した地下水および地下空気の同時回収技術について

○尾崎哲二(国際航業)・白川俊明(同)・山内大祐(同)

1. はじめに

VOCs 汚染土壌の原位置浄化工法として、スーパーウェルポイント工法(以下、SWP 工法)を利用した技術(以下、本工法)を開発した。SWP 工法では、真空ポンプにより井戸管の空気を吸引して地下水に負圧を生じさせるが、本工法では井戸管周辺の地下空気も積極的に吸引するようにしたもので、これにより VOCs で汚染された地下水と地下空気を同時に回収することができる。本稿では本工法の仕組みと実施事例、さらに本工法による鋼矢板を用いた浄化法について報告する^{1), 2), 3), 4), 5)}。

2. 本工法の仕組み

2.1 SWP 工法

本工法のもとになる SWP 工法(図-1)は地下水位低下工法として考案されたもので、真空ポンプによって井戸管内を吸引することにより真空度を上げ負圧状態にして管内の地下水面を同じ負圧にする工法である。これにより井戸管内と井戸周辺の地下水の間に大きな動水勾配を生じさせて地下水を多量に集め、水中ポンプで揚水する仕組みである。その結果、井戸周辺の地下水位が大きく低下する。

この工法のポイントは井戸管周辺の不飽和層からの空気の入り込みをできるだけ防ぐ工夫がなされていることである。地下水位の低下にともない不飽和層の空気が井戸管に入り込めば井戸管内の真空度が低下し、その負圧を維持できない。そこで、SWP 工法では、井戸管が上蓋に空気を吸引する孔のほかは下端近くに通水口があるだけの閉じた構造をしており、この通水口から上部数メートルの井戸管を取り囲むようにスクリーンが取り付けられている。この構造により空気の入り込みが抑えられ、井戸管内の負圧が維持される。

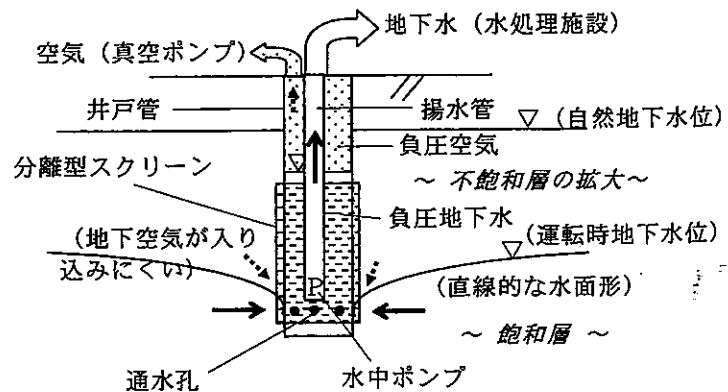


図-1 SWP 工法の概要

2.2 本工法

(1) 本工法考案の背景

SWP 工法の特徴として挙げられるのは、地下水の揚水により地下水位が大きく低下し、それが水平方向に傾斜する直線的な形状を示す点である。これを土壌汚染の立場から見れば、飽和層に存在する VOCs が不飽和層に移行することを意味する。

VOCs による汚染土壌や汚染地下水の浄化法のうち、VOCs を回収する工法には土壌掘削、地下水揚水法、ガス吸引法、エアースパーキング法などがある。土壌掘削では掘り上げた土壌に石灰などを混合して VOCs を揮発させ、地下水揚水法では汲み上げた地下水を曝気して VOCs を揮発させる。また、エアースパーキング法は飽和層に気泡を送り込み、この気泡に VOCs を揮発させている。このように VOCs 汚染土壌や汚染地下水から VOCs を分離するには揮発による方法が一般に用いられている。

以上の観点から SWP 工法を VOCs 汚染土壌の浄化に利用できないかとのアイデアが生まれた。すなわち、VOCs で汚染した地下水を多量に揚水し、拡大する不飽和層中の地下空気を吸引して浄化を図る工法である。しかし、それは SWP 工法の仕組みと矛盾する考えであった。

(2) 本工法の仕組み

上述のように SWP 工法は井戸管内を適切な真空度に維持することが重要である。一方で井戸管内の真空度は井戸管に入り込む空気量と真空ポンプの吸引能力の関係で決まる。井戸管に空気の入り込む量が少なければ真空度の制御は可能であるが、入り込み量が多く真空ポンプの吸引能力が不足すれば井戸管内の真空度が下がる。すなわち、地下水に効果的な負圧を与えることができない。

しかし、入り込む空気量を真空ポンプの吸引能力範囲内に制御できれば、井戸管内の真空度を維持しつつ井戸管周辺の地下空気を吸引することは可能ではないかと考えた。本工法(図-2)はこれを実証した。後述する実施事例では、井戸管内に吸引される空気量は井戸管内の地下水位と周辺の地下水位に影響を受け、周辺の地下水位や井戸管内の地下水位が高いときには空気の入り込む量は少なく、ともに低い場合には多量の空気が入り込むことが観察された。つまり、周辺の地下水位面と井戸管内の地下水位面の距離が入り込む空気量に影響を与え、その距離が長ければ入り込む空気量は少なく、短ければ多くなることが推定された。実施事例では、周辺の地下水位は降水量が多い時をのぞけば低下していたが、井戸管内の水位を制御することにより入り込む空気量を調節した。

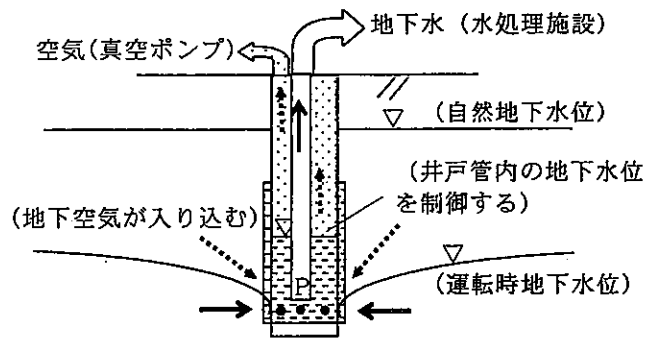


図-2 本工法の概要

3. 実施事例

3.1 対象地の地質と汚染状況

対象地(図-3)の地盤は花崗岩を基盤とする砂層主体の洪積層および表層部の盛土により構成される。地下水は花崗岩上部の風化部から洪積層にかけて帯水層を形成し、岩盤の傾斜に沿い概ね東から西に向い流れている。地下水位は地表から8m 付近の洪積層にあり、汚染の存在する洪積層は細粒土の混入が多くやや難透水性を示す。

土壌調査の結果、対象地では工場敷地の境界付近の東西約40m、南北約15mの範囲にトリクロロエチレン(以下、TCE)による汚染が確認された。その範囲は旧工場排水路からの漏出地点と推定されるA区域と、旧工場の汚染源からの拡散が及んでいると推定されるB区域に分けられる。

A区域の漏出地点近傍と推定されるB-2およびB-5では地表から深度12mまでのほとんどの深度でTCEの土壌溶出量基準(0.03mg/L以下)を超え、深度2m~3mの浅い深度で高濃度を示す。最高濃度はB-5の深度1.5mで100mg/Lである。近傍のB-3、B-4の浅層部ではほとんど検出されず5m以深で比較的高い濃度を示す。最高濃度はB-3の深度8mで0.2mg/Lである。B区域ではB-1、B-6およびB-7とも同様の汚染状況を示し、表層から深度3mまでTCEが検出されるが基準を超えない。しかし深度4mから10mまでのほとんどの深度で基準を超え7mで最高濃度を示し、それ以深では低下して深度11mで基準未満となる。最高濃度はB-1で1.4mg/L、B-6で0.38mg/L、B-7で0.22mg/Lである。

地下水ではB-1、B-2、B-3、B-4においてTCEおよびシス1,2-ジクロロエチレン(以下、cis-1,2-DCE)

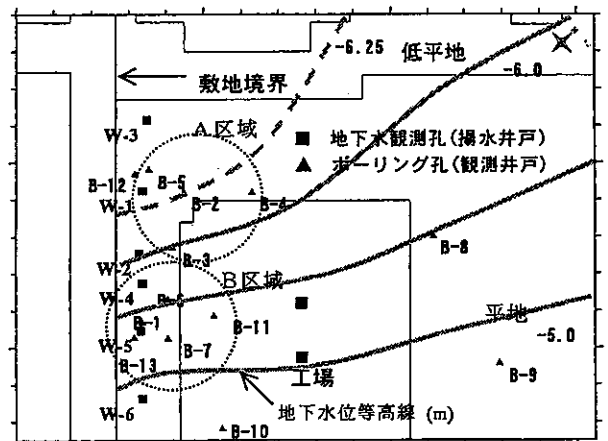


図-3 対象地平面図(地下水観測孔、ボーリング孔)

が検出された。TCE 濃度はすべての孔で基準を超え、最高濃度は B-1 の 15 mg/L である。しかし cis-1, 2-DCE 濃度は、すべての孔で基準 (0.04 mg/L 以下) を超えない。東側の敷地境界付近ではすべての地下水観測孔で TCE および cis-1, 2-DCE が検出され、TCE 濃度はすべての孔で環境基準を超える。最高濃度は W-2 の 19 mg/L である。

3. 2 浄化履歴および施設

浄化履歴を表-1に、井戸仕様を表-2に示す。

平成11年12月、汚染の敷地外への拡散防止を目的に2本の揚水井戸で地下水の揚水を開始した。1年後には4本追加し、約3年の運転ののち平成15年12月より本工法を開始し、現在(平成18年3月)に至っている。揚水井戸は図-1に示す地下水観測孔(W-1~W-6)を転用した。

地下水揚水法では家庭用ポンプとして利用される簡易式真空汲み上げポンプにより揚水し、曝気式の水処理施設で処理した。処理水は下水道へ排水し、処理ガスは大気へ排出した。本工法ではA、

Bの2本の井戸(図-4)から地下水および地下空気を回収し、上記の水処理施設および活性炭槽で処理した。真空ポンプは水封式真空ポンプ(5.3m³/min×3mmHg~600mmHg×6P×11kw)1台を使用し、2つの井戸から同時に吸引した。水中ポンプにはディープウェル用水中ポンプ(11kW、全揚程35m、吐出し量1.0m³/min)を使用した。

3. 3 モニタリングデータ

(1) 地下水位

地下水位の低下状況について、地下水揚水法による運転時と本工法による運転時の地下水位を図-4に示す。図-4から、地下水揚水法に比べ本工法による地下水位の低下が大きいことがわかる。

(2) 地下水揚水量

地下水の揚水を開始した平成11年12月からの月別の揚水量および累積量を図-5に示す。図-5より当初の2本の揚水井戸による揚水量がおおよそ50m³/月~100m³/月の範囲にあり、揚水井戸が6本になった平成12年11月からは平均的にそれまでの2倍以上のおよそ200m³/月の揚水量となっている。本工法となった平成15年12月からの増加は顕著で400m³~500m³/月の揚水量を示す。しかし、最近の1年間では減少傾向がみられる。これは降水量が少なかったことやメンテナンス回数が多く停止した期間が長かったことによるものと考えられる。

(3) TCE 回収量

TCEの回収量を図-6に示す。地下水による

表-1 浄化履歴

時期	工法	井戸
H11.12~(約1年)	地下水揚水法	W-1、W-2(2本)
H12.12~(約3年)		W-1~W-6(6本)
H15.12~H18.3 (約2年3ヶ月)	本工法、 地下水揚水法	A、B、 W-1~W-6(8本)

表-2 井戸仕様

井戸	井戸構造		スクリーン設置深度
W-1~ W-6	口径 100mm	深度4m~(10 ~12)m	最下部に吸込口
A	掘削径 550mm	深度15m	5m~13m
B	管径 400mm	深度14m	5m~12m

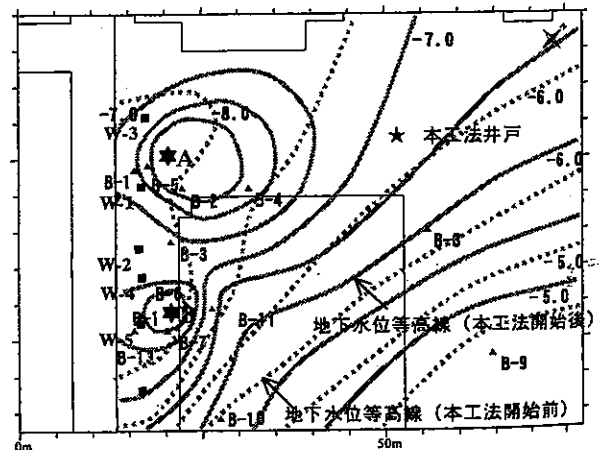


図-4 本工法井戸の設置場所と本工法運転前後の地下

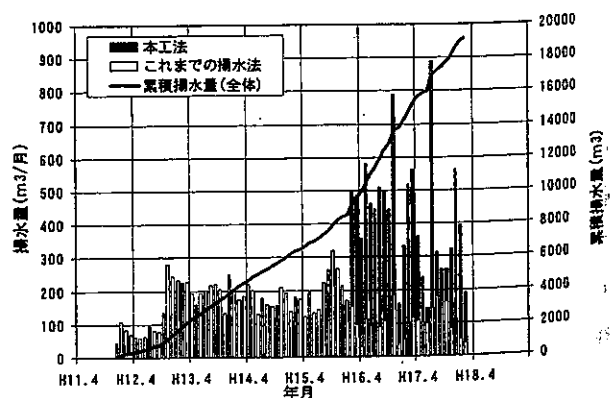


図-5 地下水揚水量

TCE 回収量は揚水量に TCE 濃度を乗じて、地下空気吸引による回収量は回収する空気量に TCE 濃度を乗じて求めた。図-6より、地下水揚水法による浄化期間中の TCE の累積回収量は地下水の揚水量と比例した状況を示す。これは揚水した地下水に含まれる TCE 量がほぼ同じ濃度であることを示す。

本工法を開始した平成 15 年 12 月から TCE の回収量は急激に増加し、それまでの回収量に比べ全体では 5 倍程度の増加である。ただし、地下水の揚水による回収量が以前に比べやや低下している。これは、井戸管内で地下水中の TCE が揮発して吸引される地下空気中に移行しているためと考えられる。平成 17 年に入る頃から空気吸引による回収量が大きく減少している。これは地盤中の浄化が進み、後述するように地下水および地下空気中の TCE の濃度が低下したためと考えられる。

(4) 地下水の TCE 濃度

地下水中の TCE 濃度の変化について、A 区域の B-2、B-3 および W-3 のデータを図-7に示す。

図-7より、B-2 は当初 5 mg/L 程度の、B-3 は 10mg/L を越える濃度であったが、地下水揚水により 2 mg/L 近くまで低下している。本工法を開始してからの低下傾向は顕著で、およそ 2 年後の平成 18 年 3 月には B-2 は環境基準 (0.03 mg/L) を下回るまで、B-3 は 0.1mg/L 近くまで低下している。W-3 は当初 0.2mg/L~1mg/L を推移するが、本工法開始後の低下傾向が著しく、ほとんどのデータで基準を下回る。

(5) 地下空気の TCE 濃度

観測井戸および揚水井戸内の地下空気の TCE 濃度を検知管により測定した。A 区域の B-2、B-5 および W-3 のデータを図-8に示す。図-8より、B-2 では 1000ppm レベルであった濃度が本工法の開始後に低下して 10ppm 前後で推移し、平成 18 年 3 月には 0.2ppm に達している。B-5 でも数百 ppm レベルであった濃度は低下し、1 年後には検知管の検出限界の 0.1ppm 以下になっている。W-3 においても同様の傾向を示し 200ppm を超える濃度は低下し、半年後には検出限界以下になっている。

(6) 地下空気圧

本工法の運転中の観測井戸内の地下空気圧を測定した。平成 11 年 4 月に実施したデータを図-9に示す。

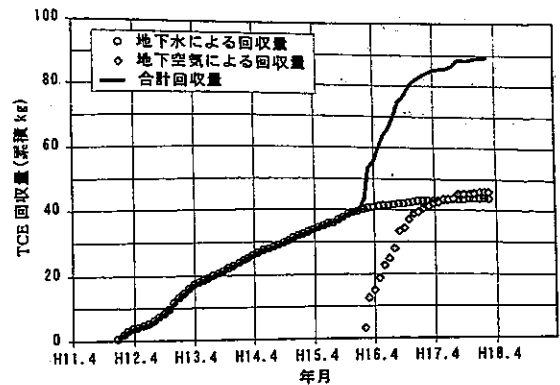


図-6 TCE 回収量

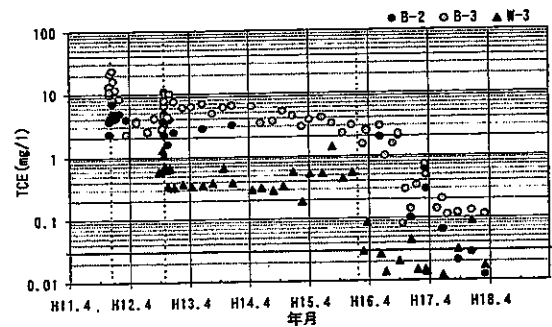


図-7 地下水の TCE 濃度

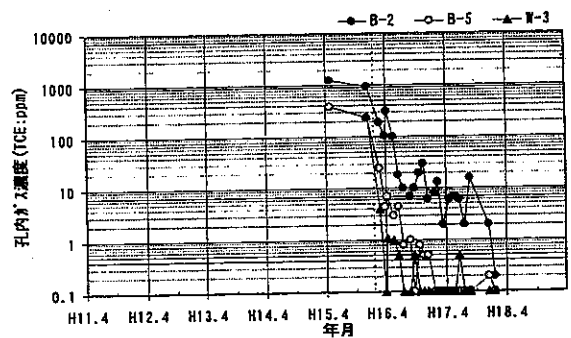


図-8 地下空気の TCE 濃度

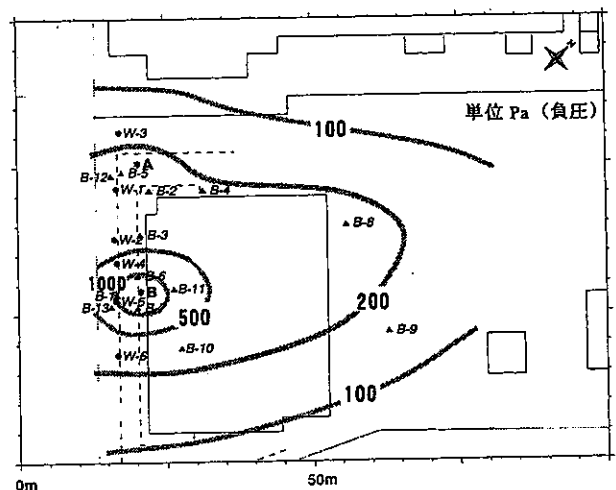


図-9 地下空気圧の分布

この時の井戸 A の井戸管内部の地下空気圧（負圧）は 44000Pa 程度、B では 32000Pa 程度であった。図-9 より SWP 井戸から 50m の距離においても 100Pa の負圧を示し、広範囲に地下空気を吸引している。また、地下空気圧の等高線は井戸 B を中心に形成され、井戸 A の影響が小さい。この等高線形状は対象地では恒常的なもので、これを井戸管内の地下空気圧と比較すれば、負圧が大きい（真空度が高い）井戸 A では周辺の負圧が小さく、負圧の小さい（真空度が低い）井戸 B では周辺の負圧が大きい。一方、揚水量では井戸 A の揚水量が井戸 B に比べ多かった。

これらの結果は、井戸 A では地下空気の入り込み量が少なく、そのため周辺の地下空気の吸引も少なかったが、地下水の負圧が保たれ揚水には効果的であった。一方、井戸 B では地下空気の入り込み量が多く周辺の地下空気が吸引されて空気圧は低下したが、地下水の負圧が小さくなり揚水量が少なかったものと考えられる。

(7) 土壌の TCE 溶出量

本工法の開始前と開始 1 年後の土壌について TCE 溶出量の比較をおこなった。A 区域では B-12（揚水前）と B-5（本工法開始 1 年後）のデータを、B 区域では B-1（揚水前）と B-13（本工法開始 1 年後）のデータを比較した。これらを図-10 に示す。ただし、比較したボーリング孔同士は図-1 に示すように 1m 程度離れている。図-10 より、A、B 区域とも深度 9m 近くまでの浄化が確認されるが、9m 以深では浄化が確認できない。これらのボーリング孔近傍では地下水位が 9m 近くまで低下しており、浄化状況と対応させれば不飽和層となった深度では浄化が進み、飽和層のままであった深度では浄化が進まなかったものと考えられる。

3.4 まとめ

SWP 工法に地下空気を積極的に吸引する機能を付加した本工法を開発し、VOCs 汚染土壌の浄化対策に適用した。その結果、VOCs の回収が順調に進み、特に不飽和層における浄化が良好であった。

4. 鋼矢板を用いた浄化法

実施事例では汚染した自然地盤を対象とした。しかし、地下水、地下空気は対策を要しない遠い場所からも回収しており効率的ではない。そこで、本工法の特長を生かした浄化法を下記のとおり検討した。

SWP 工法は地下掘削工事において地下水位低下工法（水替工）として利用されることが多い。それは、この工法が掘削場所を鋼矢板で締切って適用すれば、地下水位が水中ポンプ直上まで低下し、鋼矢板周辺の地下水位の低下が小さく、周辺からの地下水の浸透量が少ないという特長があるためである。これらの特長は本工法にも効果的であると考えられる。そこで、図-11 に示す浄化法を考案した。

それは汚染範囲を鋼矢板で取り囲み、中心に SWP 井戸を設置するもので鋼矢板の打設範囲は最大で 30m 四方程度、その深度は汚染土壌の下端から 2m 程深い位置を想定している。すなわち、地下水を揚水して汚染土壌の全体を不飽和層に移行させ、同時にその地下空気を吸引する浄化法であり、不飽和層

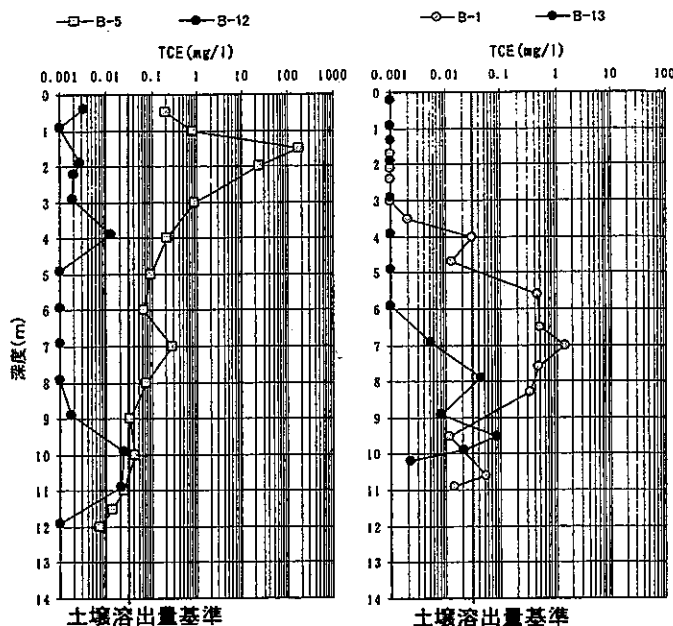


図-10 土壌溶出量比較

に存在する VOCs を揮発させ地下空気とともに回収する仕組みである。

ここで問題になるのは地盤には空気が通りやすい空隙が存在することである。吸引しても地表から空気が入り、同じ空隙を通過すれば全体の浄化は難しい。そこで、図-11に示すように地表をシートなどの空気を遮断できる材料で覆う。これにより、内部の真空度が高まり、汚染土壌がもれなく負圧下に置かれることが期待できるから VOCs を揮発回収できるものと考えている。

土壌が吸引されて負圧下に置かれた場合、水分の揮発（蒸発）により含水率がどの程度減少するのか室内試験により検証している。試験は、シルト質土壌の試料を鉄製の釜に入れ、この釜を真空ポンプにより吸引したもので、経時的に土壌の含水率を測定した。真空ポンプの圧力を 0.085Mpa（負圧）とし、3 試料を用いた。結果を図-12に示す。なお、比較のため室内の自然乾燥状態の 3 試料について含水率を測定した。これを図-13に示す。

図-12より、当初 53.6%（3 試料の平均）であった含水率が試験開始 26 時間後には 1.6%（3 試料の平均）まで低下している。図-13の自然乾燥の試料は、この含水率まで低下しておらず、真空引きによる土壌水分の蒸発量がきわめて大きいことを確認できる。

以上より、土壌を吸引して負圧下に置けば含水率が比較的短期間に数%のレベルまで低下することがわかった。VOCs が水より揮発しやすい物質であることを考えれば、土壌に含まれる VOCs も同様に揮発が進み、地下空気とともに回収できるものと考えている。

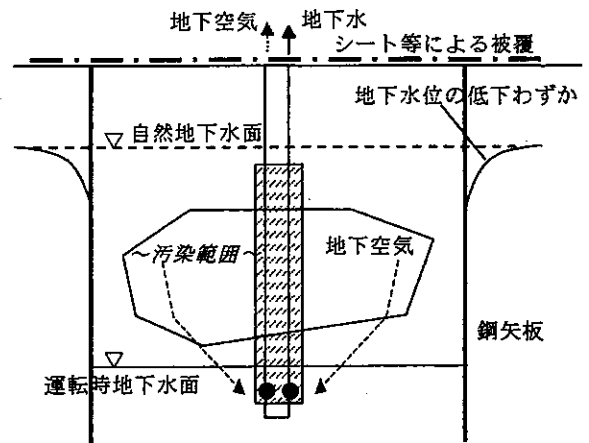


図-11 鋼矢板締切りによる浄化工法

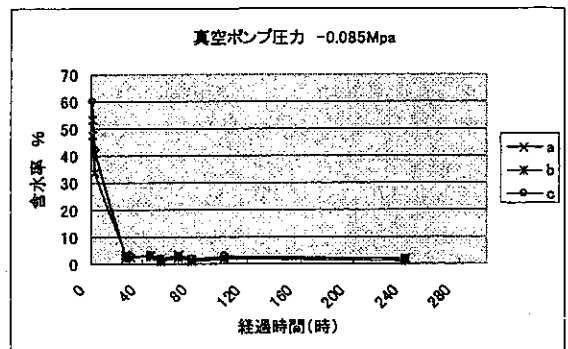


図-12 真空引きによる含水率の変化

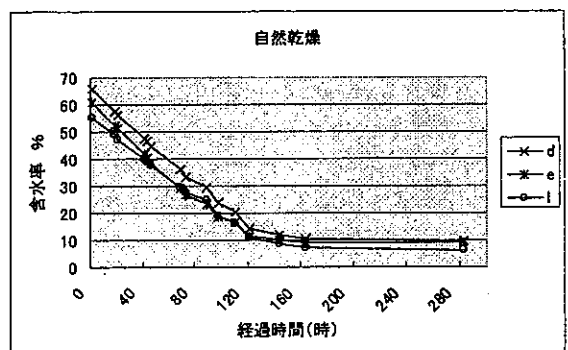


図-13 自然乾燥による含水率の変化

参考文献

- 1) 有限会社アサヒテクノ：スーパーウェルポイント工法に関する資料。
- 2) 尾崎哲二、山内大祐、白川俊明、千葉政孝、高橋茂吉（2005）：強力な真空力を利用した VOCs 汚染土壌の浄化技術の開発、土壌環境センター技術ニュース 10、6～11。
- 3) 白川俊明、山内大祐、小宮山栄一、尾崎哲二（2006）：真空ポンプを活用した VOCs 汚染土壌の原位置浄化の経過報告、第 12 回地下水・土壌汚染とその防止対策に関する研究集会、725～730。
- 4) 中川啓、羽井和郎、神野健二、和田信一郎、朴崎鎮、中山比佐雄、高橋茂吉（2006）：スーパーウェルポイント工法（SWP 工法）の地下水低下に関する数値解析による検討、2006 年春季講演会講演要旨、94～97。
- 5) 細川土佐男、高橋茂吉、神野健二、中山比佐雄、朴崎鎮（2006）：飽和-不飽和浸透解析による改良型バキュームウェルポイント工法の水位低下に関する検討、2006 年秋季講演会講演要旨、製本中。