

既設構造物直下の施工を可能とする 多用途地盤改良/環境修復技術 (グランドフレックスモール工法) の開発

松井秀岳¹・石井裕泰¹・堀越研一²

¹正会員 工修 大成建設株式会社 技術センター 土木技術研究所
(〒245-0051 神奈川県横浜市戸塚区名瀬町344-1)

²正会員 Ph. D. 大成建設株式会社 技術センター 土木技術研究所
(〒245-0051 神奈川県横浜市戸塚区名瀬町344-1)

斜め・曲がり・水平方向の制御が可能な自在ボーリング技術を用いた、既設構造物直下の地盤改良技術、グランドフレックスモール工法について報告する。自在ボーリングで構造物直下に削孔し、削孔管を利用して注入管を敷設することで、薬液注入による地盤改良が可能となる。また、薬液注入以外にも、土壤浄化、空洞充填、噴射攪拌改良など、種々の地盤改良への応用利用が可能である。本報ではまず、削孔工・薬液注入工、および薬液注入以外の応用技術について述べた後、施工性、改良体の性状確認を目的に実施した施工試験の内容について説明する。さらに、実施工への適用事例として、旧法タンクの液状化対策工事、揮発性有機化合物によって汚染された地盤の土壤浄化工事を紹介する。

キーワード：地盤改良，自在ボーリング，薬液注入，土壤浄化

1. はじめに

近年の巨大地震の発生によって各種耐震基準の見直しが図られるなど、土木・建築構造物に対して高い耐震性能が望まれるようになってきている。既存構造物に対しては、上部構造の補強のみならず、液状化対策などの地盤改良も有効であるが、新設工事とは異なる施工制約が課されることになる。加えて、施設・建物を所有する事業主・住民にとっては、日常の利用を妨げられることなく施工できることが望ましい。

本グランドフレックスモール工法は、このような社会的な需要、技術的な要求に応えるべく開発された工法で、斜め・曲がり・水平方向の制御が可能な自在ボーリング技術と、各種地盤改良技術を組み合わせた工法である¹⁾。専用の削孔機(図-1)を用いて構造物直下改良対象部まで削孔したのち、削孔管を利用して、薬液注入管などを地中に敷設することができる。

薬液注入では、地盤を乱すことなく間隙を薬液に置き換えるため、上部構造物への影響が小さく、構造物の利用を妨げることなく直下の地盤を改良することができる。



図-1 専用削孔機

また、薬液注入以外にも、浄化剤・空気注入井戸を使用した土壤浄化、二種類の材料を供給直前で混合する装置を使用した空洞充填、高圧の固化材を地中で噴射・攪拌させる固結改良など、種々の地盤改良への応用利用が可能である。

本報ではまず、削孔工・薬液注入工、および薬液注入以外の応用技術について説明する。次に、施工性・改良体の性状確認を目的に実施した薬液注入に関する施工試験の内容について説明する。さらに、

実施工への適用事例として、旧法タンクの液状化対策工事、揮発性有機化合物によって汚染された地盤の土壌浄化工事を紹介する。

2. 工法の概要

(1) 削孔工

自在ボーリングで使用する削孔管の先端には、受圧面を持つ先端ビットが取り付けられている。削孔管を回転させずに推進すると、この受圧面には一定方向に偏った土圧が作用し、削孔管の進行方向を変えることができる。逆に、削孔管を回転させながら推進すると、受圧面に作用する土圧が一定方向に偏らず、直線方向に削孔することができる。

削孔中の削孔管先端の位置・傾斜、先端受圧面の向きは、適宜計測を行うことで知ることができる。本工法では、削孔管先端に搭載した機器が発進する信号を地上で受信する方法、削孔管内にジャイロを挿入する方法の二種類の計測方法を採用しており、削孔管先端上部の状況（構造物の有無）でこれらを使い分けている。計測データをもとに削孔方向を制御することで、計画線に沿った削孔を行うことができる。

削孔中は、必要に応じて打撃貫入機能（パーカッション機能）を併用することが可能で、事前の地盤調査では判明しなかった固い地盤、コンクリート、転石などに遭遇した場合でも、これらを貫通・回避することができる。また、長距離削孔や作業時間に制限が課された場合に想定される削孔中断後の再削孔においても、パーカッション機能を使用することで、残置した削孔管周辺の地盤を緩めることができ、推進不能の事態を回避することができる。

図-2に削孔から削孔管回収までの施工手順を示す。削孔完了後、二重管構造となっている削孔管先端部のインナーヘッドを回収し、削孔管先端を開放する。

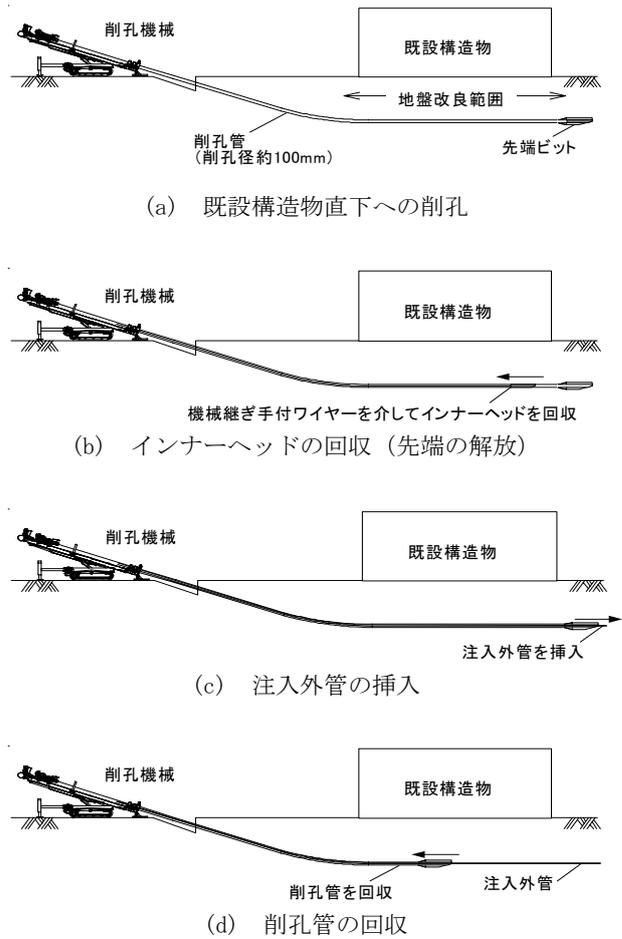


図-2 施工手順

次に、削孔管内に注入外管を挿入した後、削孔管のみを回収することで、注入外管を地中に敷設することができる。

(2) 薬液注入工

薬液注入工は、地中に設置した注入外管の中に注入内管を挿入して行う。本工法では、従来から薬液注入に用いられるダブルパッカー方式のほか、新しく開発したセルフパッカー方式（図-3）の利用も可

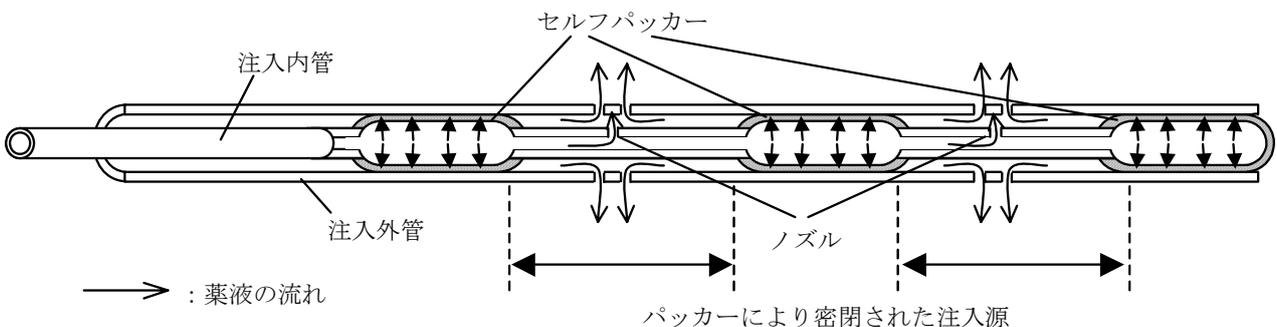


図-3 セルフパッカーを用いた注入方式

能である。セルフパッカー方式では、注入外管内に密閉された注入源を確保する際、地盤内に注入する薬液の圧力で、注入内管に取り付けられたパッカーを膨らませることができる。そのため、従来方式のようにパッカー専用の圧力供給経路を必要とせず、注入内管の構造を、単純かつ小型にすることが可能となった。また、複数点の同時注入が可能であり、注入作業の効率化にも有効である。

(3) 応用技術

本工法は、薬液注入による標準的な施工方法に加えて、種々の地盤改良への応用利用が可能である。

土壌浄化への利用では、薬液注入と同様に地中に設置した注入外管から浄化剤を注入することができる。また、揮発性有機化合物の汚染地盤に対しては、揮発促進のための空気注入井戸、揮発したガスを回収するガス回収井戸を、それぞれ自在ボーリングで設置し浄化することが可能である。

地中空洞部の充填への利用では、削孔管先端部で二液を混合する機能をもつ先端ビットを使用する。セメントおよびベントナイトを削孔管内の独立した経路で供給し、注入直前で両者を混合することで、充填用セメントベントナイトとして、空洞部に充填することができる²⁾。

噴射攪拌による固結改良への利用では、削孔管を利用して噴射装置を地盤内に挿入し、先端の噴射口から高压の固化材・圧縮空気を地中に噴射する。噴射の圧力で地盤を切り崩し、噴射装置を回転させて攪拌・混合することで、円柱状の改良体を造成することができる。施工試験において、一軸圧縮強さで 1MN/m^2 を超える強度を確認した³⁾。

また、先端ビット後方に取り付けた計測器で得た削孔管の傾斜・方向データを、無線通信で地上に送信する位置計測システムも実用化に至っている⁴⁾。

3. 施工試験

(1) 注入試験

a) 試験概要

千葉県館山市の沿岸部の敷地にて、セルフパッカー方式の注入内管を用いた注入試験を実施した。

図-4に試験の概要を示す。ここでは、注入方式の有効性確認を目的としているため、削孔工は省略し、注入外管は人工地盤中に埋設することで敷設した。

人工地盤には、浅間山砂 ($\rho_s=2.71\text{g/cm}^3$, $F_c=8.1\%$, $D_{50}=0.24\text{mm}$) を用いた。注入外管にそった薬液の逸

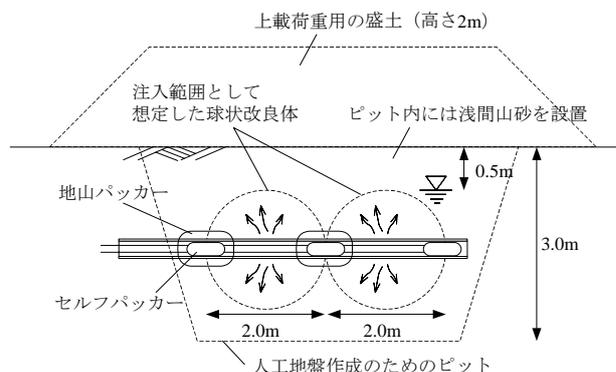


図-4 注入試験の概要

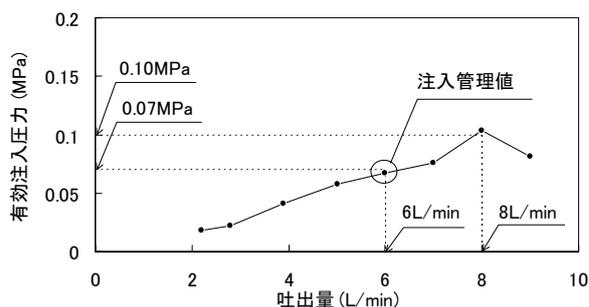


図-5 限界注入速度試験（注入試験）

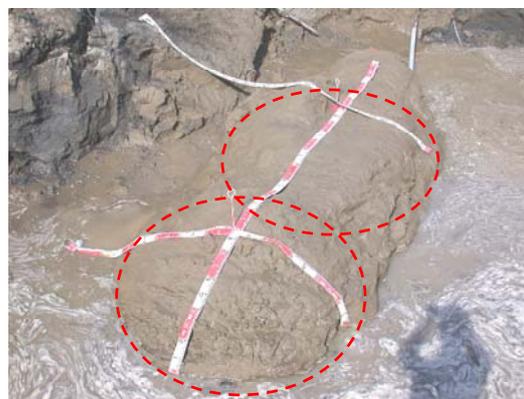


図-6 改良体の観察状況

走を防止する目的で、注入地点をはさんだ位置に地山パッカーを設置した。

薬液の注入に先立ち、水を用いた限界注入速度試験を実施し、得られた吐出量と有効注入圧力の関係から、限界注入速度を判定した。吐出量と有効注入圧力が概ね比例関係となり、薬液が徐々に浸透すると判断される吐出量は、図-5に示すように 8L/min 以下であった。注入対象がゆるい人工地盤であることから、可能な限り吐出速度を落とすことが望ましいと考え、1改良体あたり 6L/min、2改良体同時に合計 12L/min で浸透注入を行った。計画改良体径は 2.0m、1改良体あたりの薬液注入量は 1,885L とし

た。

b) 試験結果

注入開始時に、注入圧力の上昇が見られたものの、ノズルの洗浄を行った後は圧力が安定し、約 6 時間で 2 改良体分の注入を完了した。地中で養生した後、地盤を掘削し、改良体を観察した。図-6に改良体の観察状況を示す。隣接する 2 つの改良体を、ほぼ等しい大きさ・形状で造成することができた。また、造成された改良体からコアを採取し、一軸圧縮試験を実施したところ、平均で 0.2MN/m^2 程度の強度が確認され、一般的に液状化対策で必要とされる一軸圧縮強さ 0.1MN/m^2 を満足することができた。

(2) 削孔・注入試験

a) 試験概要

茨城県神栖市の工場敷地にて、自在ボーリングによる削孔から、薬液注入による地盤改良までの一連の工程を通して実施し、施工性の確認を行った。

図-7に試験の概要を示す。対象地盤は N 値 20 程度、細粒分含有率 $F_c=11\sim 31\%$ の沖積砂層で、水平距離 40m、深さ 3.15m の地点を目標改良位置とした。

前述の注入試験と同様に、限界注入速度試験を実施し、吐出量と有効注入圧力の関係を調べた。図-8に試験の結果を示す。この結果をもとに、1 改良体あたり 10L/min 、2 改良体同時に 20L/min で浸透注入を行った。計画改良体径は 2.48m 、1 改良体あたりの薬液注入量は $4,640\text{L}$ とした。

b) 試験結果

一時的に薬液の逸走が見られたが、注入圧、注入量ともに安定し、約 7.5 時間で計画量の注入を完了した。地中で養生した後にコアを採取し、一軸圧縮試験を実施したところ、平均で 0.15MN/m^2 程度の強度が確認された。

削孔から注入外管の敷設、注入作業にいたる一連の工程を滞りなく実施することができ、工法全体の施工性を確認することができた。

4. 適用事例

(1) 旧法タンクの液状化対策工事

a) 工事概要

本工事は、特定タンクの液状化対策工事で、対象タンクは $8,000\text{kL}$ タンク 2 基、 $2,000\text{kL}$ タンク 3 基、計 5 基である。図-9に現場の平面図を示す。改良対象は、タンク直下の $\text{GL}-2.0\text{m}\sim -4.0\text{m}$ のゆるい砂質土層（埋土）で、施工中の施設利用が可能な薬液注

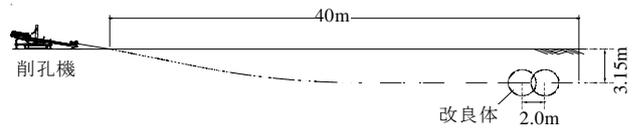


図-7 削孔・注入試験の概要

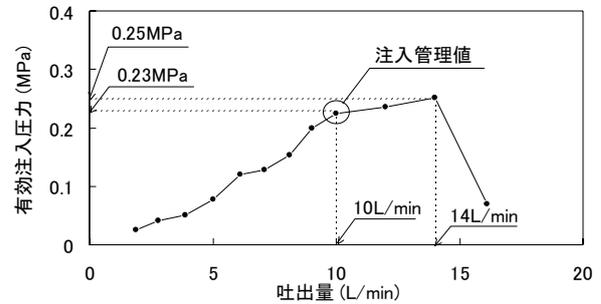


図-8 限界注入速度試験（削孔・注入試験）

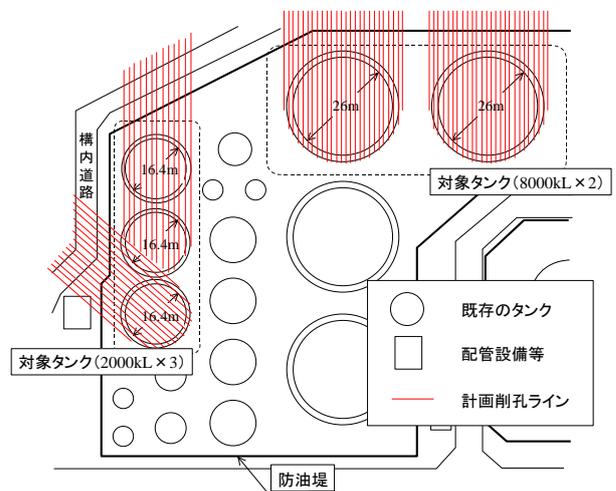


図-9 平面図

表-1 施工数量

総削孔延長	4,769 m
削孔本数	92 本
注入薬液量	1,776 kL
改良球体数	2,019 個

入による基礎地盤改良が計画された。防油堤外部に立坑を設け、そこから水平削孔を行う案も検討されたが、安全性・工期・工費において優位かつ、タンクの稼動に必要な構内道路の確保が可能なグラウンドフレックスモール工法が採用された。

表-1に施工数量を、図-10に計画断面の一例を示す。構内道路の利用を妨げないように、構内道路外側からの削孔開始を前提に、計画線を定めた。また事前の施工試験で 100m 程度の削孔が可能であることを確認した上で、 $2,000\text{kL}$ タンク 2 基については

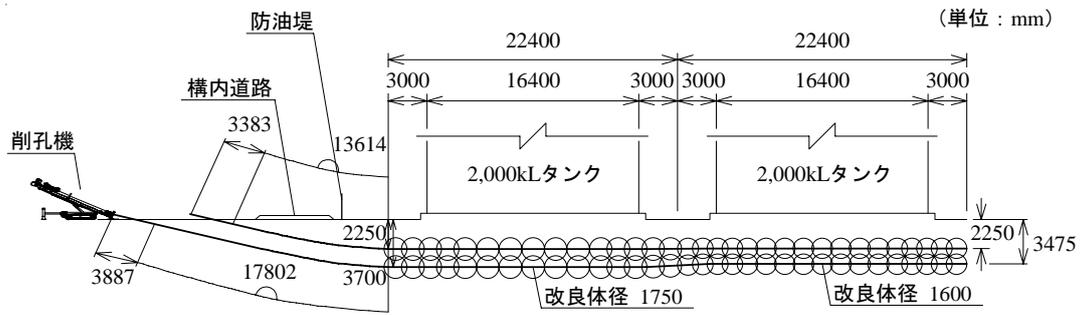


図-10 計画断面の一例 (2,000kL タンク)

図-10に示すように、一括して削孔するよう計画し、削孔総延長および工期の短縮を図った。

b) 地表面変状管理

削孔・注入時のタンクの変位量は、水盛式沈下計によって管理した。対象タンク外周部の4方向に計測点を設け、各点の変位を一定時間ごとに自動計測し、現場事務所に設置したコンピューターに表示するシステムを採用した。注入作業時には一次管理値として、隆起量 17.5mm、傾斜±8.0分を定め、その値を超えた場合は、変形が戻るまで作業を中断することとした。

c) 削孔結果

削孔機を2セット投入し、全工程を計画どおりの約3ヶ月で終了した。図-11に、削孔結果の一例を示す。適宜計画線との誤差を計測し、方向制御を行うことで、精度良い削孔を行うことができた。削孔中は転石や薄いコンクリート板に遭遇することがあったが、適宜パーカッション機能を併用することで問題なく施工することができた。また、騒音などに配慮し夕方以降の作業を制限したため、削孔途中で作業を中断し、翌日、削孔を再開することが度々あった。作業中断から再開まで削孔管は地中に残置したが、パーカッション機能を使用することで、再削孔時に推進不能となることはなかった。

d) 注入結果

注入改良には恒久グラウトのパーマロックを使用し、セルフパッカー方式による2点同時注入を行った。注入時の地表面変状は全体的に小さく、前述の一次管理値を超える変位は発生しなかった。発生した変位も、時間を置くことでおさまり、タンクを含む施設の稼動を妨げることなく施工を完了することができた。

タンク外周部から採取したボーリングコアを用いて、一軸圧縮試験、繰返し非排水三軸試験を実施し、改良効果を確認した。一軸圧縮強さによる設計基準強度 60kN/m² に対して得られた平均値は 117kN/m² となり、各タンクで必要となる液状化強度

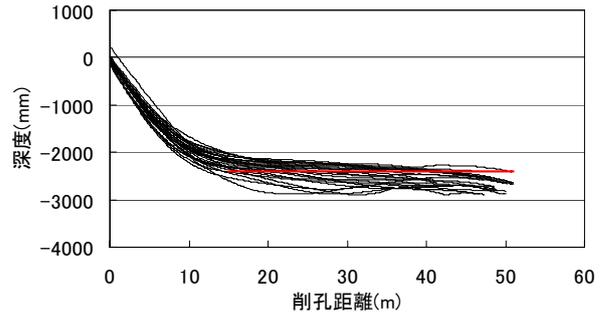


図-11 削孔結果

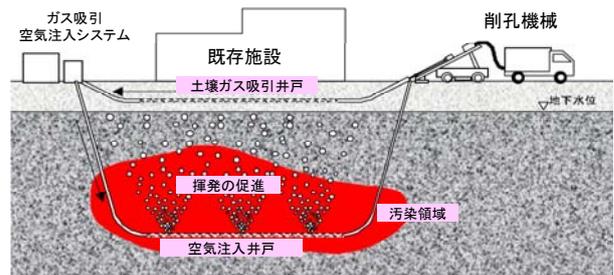


図-12 浄化工事概要

比 0.31 に対しては 0.50~0.84 が得られた。

(2) 揮発性有機化合物汚染地盤の浄化工事⁵⁾

a) 工事概要

対象地盤は埋立護岸内の細砂層（透水係数 10⁻³cm/sec）で、深さ 5m 程度までの、地盤および地下水がテトラクロロエチレン（PCE）、トリクロロエチレン（TCE）、シス 1・2 ジクロロエチレン（cis-1,2-DCE）で汚染されている。地下水位は、GL-1.0~-1.5m 程度で、地表面はコンクリートで被覆されている。

図-12に工事の概要を、図-13に現場の平面図を示す。汚染領域に設置した空気注入井戸から送気し、汚染物質の揮発を促進するエアスパーキング工法で浄化を図った。揮発した汚染物質は不飽和帯に設置した土壤ガス吸引井戸で回収した。

空気注入井戸および土壤ガス吸引井戸は、自在ボ

ーリングで設置した。各井戸管の外径はφ90mm と削孔管内径φ50mm に対して大きく、図-2で示した手順では敷設ができないことから、先行削孔した後、各井戸管を拡径しながら引き込むことで設置した。

b) 施工結果

図-14に、空気注入・ガス吸引時の地下水濃度を示す。PCE, TCE については、稼動前後で2~3 オーダー程度、cis-1,2-DCE についても1 オーダー程度の濃度低下が見られ、一定の浄化効果を確認することができた。

5. まとめ

自在ボーリングを用いた既設構造物直下の地盤改良工法であるグランドフレックスモール工法について、工法の特徴、注入試験、削孔・注入試験、2 件の適用事例を示した。今後も、その特徴を活かして、既存構造物の液状化対策などに本工法を役立てていきたい。特に屋外タンクなどの健全性の確保は、企業・事業所が災害発生に備えて策定する事業復旧・継続計画にも大きく関わるものである。日常の事業活動を妨げることなく、足元の地盤を固める有効な手法を提供することで、事業主や社会に貢献していきたい。

なお、本グランドフレックスモール工法は、大成建設株式会社、株式会社キャプティ、三信建設工業株式会社、強化土エンジニアリング株式会社、成和リニューアルワークス株式会社との共同開発工法である。記して関係各位の尽力に謝意を表す。

参考文献

- 1) 石井裕泰, 檜垣貫二, 川井俊介, 三和信二, 小泉亮之祐, 小山忠雄: 自在ボーリングによる地盤改良に適した浸透注入方式の開発と実証試験, 土木学会論文集F, Vol164, No3, pp. 272-282, 2008.
- 2) 石井裕泰, 檜垣貫司: 既設構造物直下の地盤改良工法の開発, 電力土木, No. 326, pp. 70-73, 2006.
- 3) 石井裕泰, 松井秀岳: 自在ボーリングを併用した高圧噴射攪拌による現位置地盤改良工法, 電力土木, No. 344, pp. 115-117, 2009.
- 4) 石井裕泰, 檜垣貫司, 三和信二, 勝田力, 小泉亮之祐,

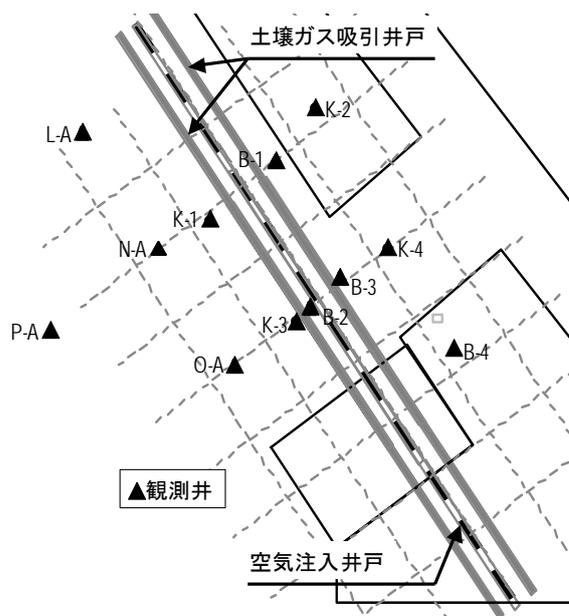


図-13 平面図

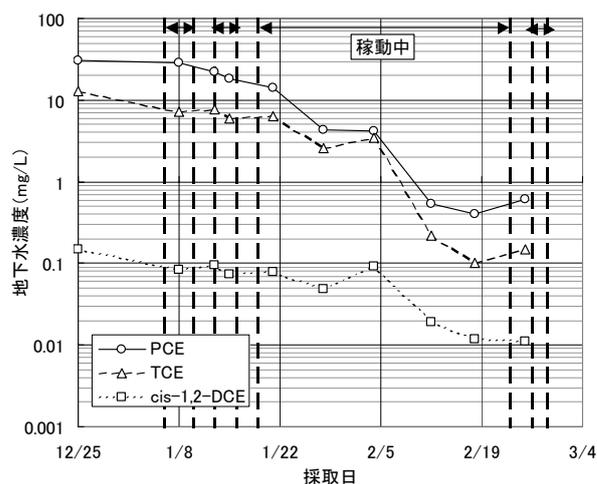


図-14 地下水濃度の変化 (観測井戸 B-4)

小山忠雄, 安部章正: 自在ボーリング技術を用いた地盤改良工法-無線式リアルタイム位置確認システムを用いた削孔試験, 大成建設技術センター報, No. 40, pp. 24, 2007.

- 5) 下村雅則, 中島秀也, 樋口雄一, 今村聡: 水平井戸を用いたエアスパーキングによる構造物下部の浄化効果, 地下水・土壌汚染とその防止対策に関する研究集会, 第10回講演集, pp. 351-354, 2004.