

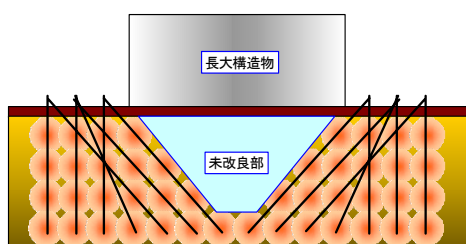
1 2. 新小型ジャイロの開発と「曲がり削孔式液状化対策工法」

構造物直下を地盤改良する施工法

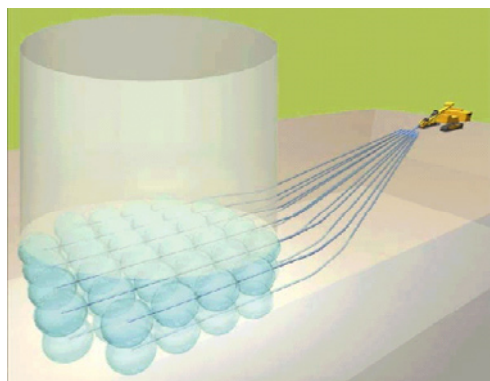
五洋建設株式会社 技術研究所 ○植田 勝紀

1. はじめに

阪神淡路大震災の後、耐震基準等が見直しされ既設構造物直下の液状化対策が求められるようになった。この施工法として、浸透性の高い恒久型の薬液を浸透注入し地盤中の間隙水を薬液に置換することで、上部構造物に影響を与えることなく地盤改良できる数種類の工法が開発された。その後、これらの工法は多くの液状化対策工事に採用され、そのニーズは次第に大型の構造物直下地盤へ、また、障害物の多い場所などへと対象が拡大してきた。構造物が長大化するほど、また、障害物が多くなるほど、従来の一般工法である直斜削孔方式では図—1に示すように未改良域が発生するなどの課題が指摘される。この課題に対して、図—2のイメージ図に示すように地盤内を3次元的な曲線を描いて削孔し、地上施設を供用状態で広範囲の構造物直下地盤を施工する「曲がり削孔式液状化対策工法」が開発され、この施工事例が報告されている。



図—1 従来の施工法



図—2 曲がり削孔式浸透固化処理工法のイメージ

本報では、新たに開発した「新タイプの小型ジャイロ」と、これを削孔位置検出装置に用いた「曲がり削孔式液状化対策工法」の概要、および施工実績等について報告する。

2. 開発の目的と課題

開発当初、既設構造物直下の液状化対策が必要な地盤を調査した。この結果、重要構造物は基礎杭などで支持されているものが多かった。また、対象構造物の大きさや地盤深度を考慮すると、総削孔長 100m程度で、地上から曲率半径 30m程度で曲げ制御した後水平にコントロールし、基礎杭間等の狭隘な地盤を正確に誘導することが必要であると考えられた。さらに、沿岸域の護岸部などでは、護岸背面直近の深度 10mを超える深い地盤を改良する条件も存在した。このためには、以下のような課題を解決する必要があった。

- ①基礎杭等が存在する構造物直下の地盤で、十分な精度が発揮できる削孔位置検出装置の実現。
- ②より高い精度で誘導削孔するために、位置検出装置とは別途に、削孔ロッド先端部の曲がり形状（曲率と向き）をリアルタイムで判定する装置の実現。
- ③削孔深度 10mを超える施工の全作業を、削孔機設置側の一方向から行う削孔システムと、地盤改良注入システムの実現。

3. 従来の削孔位置検出装置

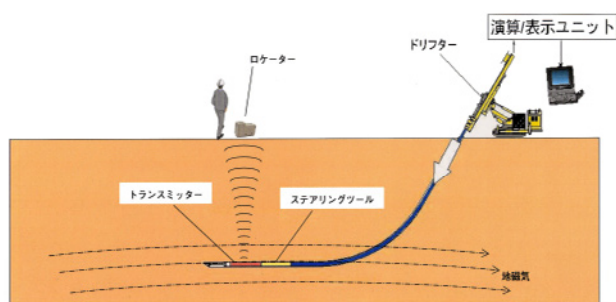
3.1 小口径ボーリングの位置検知技術

小口径ボーリングの掘削技術は、古くから井戸掘削や地盤注入工事などに採用されている。近年、小型ボーリング機の技術進歩に伴い削孔技術も向上し、これまでは鉛直削孔が主であったものが、HDD工法（Horizontal Directional Drilling Method）に代表される水平削孔や、さらに曲線箇所を増やして自在に削孔したいというニーズが多くなった。こうした状

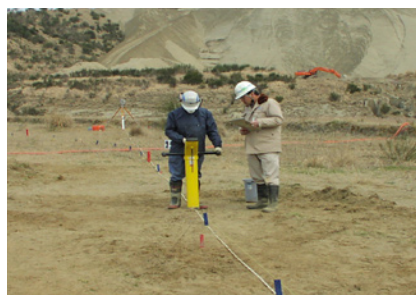
況の中で、長距離削孔や曲線施工の事例も報告されるようになった。しかし、小口径ボーリングで長距離削孔する場合の削孔位置管理は、シールドトンネルのように人が入って測量することが出来ないため、採用した位置検出装置の性能に全面的に頼らざるを得ない。さらに、外径 50～60 ミリ程度の削孔ロッド内部に装備できる小型で高精度な装置の技術的課題などが指摘されている。

3.2 位置検出装置

HDD工法において最も一般的に使われている位置検出方法の一つに電磁波検知方式がある。これは、電磁波（ビーコン）を発信するトランスミッターを削孔ロッド先端部に装備し、地上の作業者がロケータでこの電磁波を測り位置と深度を把握するもので（図—3、写真—1参照）、取り扱いも容易である。ただし、トランスミッターの直上で計測するものが多く、地上に障害物がない場合に有効である。また、ステアリングツールといわれる地磁気検知装置は、内部に地球の磁方位データと鉛直傾斜角データを検出する装置が内蔵され、削孔距離をもとにコンピュータにて積分処理をして位置演算する。この装置は、地磁気を検出する原理であり、近隣に鋼管杭や矢板などの磁性体が存在するところでは磁界にひずみが発生するため、この外乱をキャンセルする機能が必要となる。



図—3 ロケータとステアリングツール



写真—1 ロケータで地中の電磁波を計測

3.3 従来のジャイロ

従来、ジャイロを用いた方位計測方法には、ジャイロコンパスとレートジャイロの二つの方式があり、両者とも方位計測を行うものであるが、その検出方法は異なる。ジャイロコンパスは地球の自転から真北方向を求める方式であり、レートジャイロは角速度を時間積分して基準角からの相対角度を求める方式である。ジャイロコンパスは現状では大型なため、小口径削孔用に適用されるものはレートジャイロ（写真—2に一例を示す）が使われており、前進または後退しながら相対方位の変化量を検出して位置演算する。



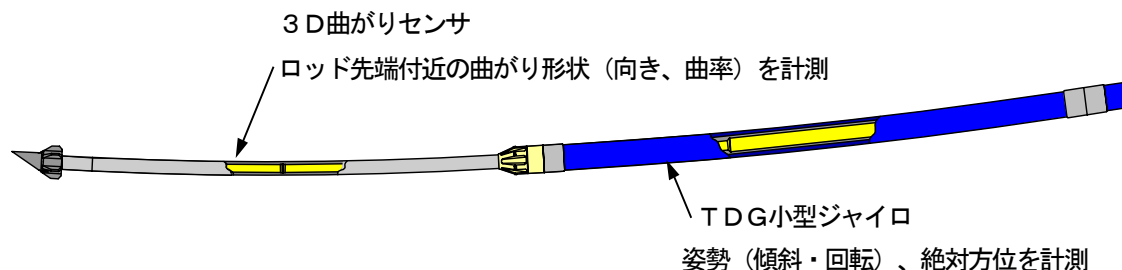
写真—2 レートジャイロの例

4. 開発した削孔位置検出システムと小型ジャイロ

4.1 位置検出システム

開発した位置検出システムは、削孔ロッド内部に組込む新型ジャイロ（以下、TDG：チューン・ド・ドラジャイロ、という）と、さらに前方先端ロッドの3D曲がりセンサの、二つの異なるセンサの組合せから構成される。図—4に削孔位置検出システムの概念図を示す。この2種類のセンサにより、以下を達成する。

- ①TDGは削孔を一時停止して絶対方位を計測する装置のため、削孔推進中の制御量（たとえば曲率半径〇〇mR達成）は3D曲がりセンサにて把握する。
- ②曲げられた量（たとえば〇〇mR達成）で数m推進した結果、後方のTDG設置位置において方位・傾斜を計測し、位置演算する。
- ③与えた制御量の上記①と、得られた制御結果の上記②との相関を数m毎に掴み、土質が変化し掘進特性が変わった場合は、早期に制御操作量の修正を行う。



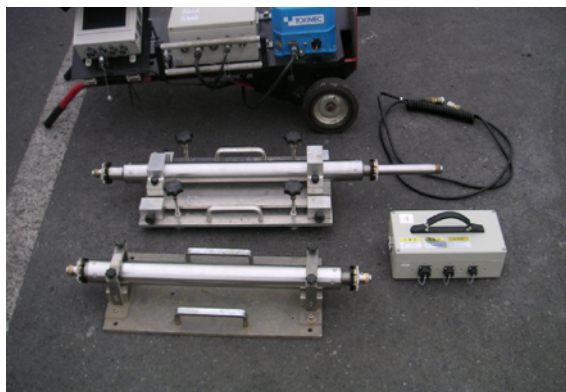
図—4 削孔位置検出システム

本システムは、位置検知の高精度化ばかりでなく、過大修正→不足修正の繰り返しなどによる蛇行を防ぎ、推進中の地盤抵抗を過大化することなく、滑らかな曲線施工と長距離削孔が容易になることを目的とした。

4.2 削孔用小型ジャイロの開発

(1) 削孔用TDGの開発

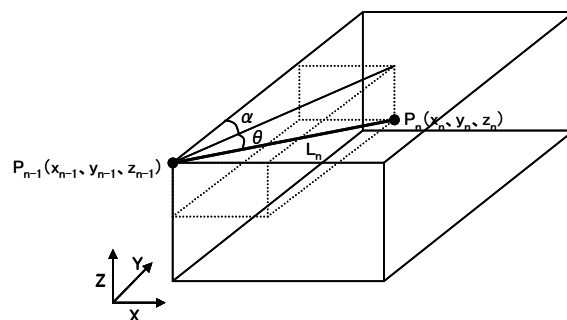
削孔用小型ジャイロを写真—3に示す。項2.で述べた基礎杭などがある構造物直下の特殊な施工条件においても誘導制御が可能となるために、機械式ジャイロとしては最も新しい原理の一つであるTDGを用いた削孔位置検出装置を開発した。



写真—3 ジャイロ装置一式

TDGを用いた位置検出装置は、ジャイロコンパスのように連続的に方位角を出力するものではなく、曲線部削孔時は約1.5m毎、直線削孔時は約3m毎に削孔作業を一時（約3分間）ストップし、その都度、水平方向の真方位と鉛直方向の傾斜角を得る。このため、計測値は定期的に得られる離散的データであり、約3分間の削孔停止中に複数回（2～3回）計測してこの平均値を採用する。このデータにより、区間ごとの推進距離をもとに3次元座標位置を演算し、この座標値のつながりで削孔軌跡を描く。図—5に本装置が管理装

置で扱う座標系と計測要素を示す。



図—5 管理座標と検出要素

直線区間の座標演算は、方位角データよりX-Y成分を、傾斜データよりZ成分を以下の式で算出する。

$$x_n = x_{n-1} + L_n \cos \theta \cdot \sin \alpha \quad \cdots \text{式 (1)}$$

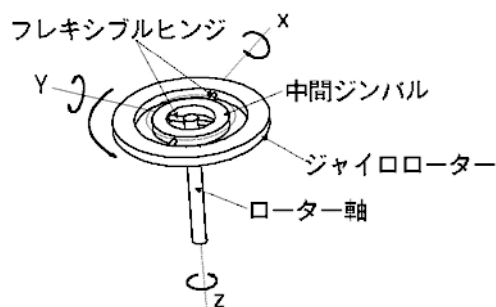
$$y_n = y_{n-1} + L_n \cos \theta \cdot \cos \alpha \quad \cdots \text{式 (2)}$$

$$z_n = z_{n-1} + L_n \sin \theta \quad \cdots \cdots \cdots \text{式 (3)}$$

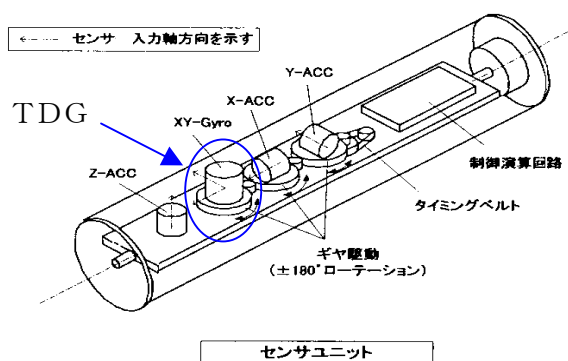
曲線区間の座標演算は、1推進距離 L_n を短く計測回数を増やして上記演算式をそのまま用いる場合と、 L_n を円弧として扱う場合の2つの方式がある。さらに、図—4に示した削孔ロッド先端部の3D曲がりセンサで検出した曲がり量と向きのデータをこのジャイロ設置位置座標の前方にリンクして、先端ビットの座標位置を算出する。

(2) TDGの方位検出原理

TDGは、二軸自由度をもつジャイロの一種であり、回転するコマの概念図を図—6に示す。このジャイロは、モータ軸にフレキシブルヒンジと呼ばれる一種の自在継手を介してジャイロロータを所定の回転数で高速回転させ、角運動量保存の法則によるフライホイールの方向保持性を利用した機械式ジャイロである。



図－6 TDGのコマの概念図



図－7 センサユニット内部

図－7に示すセンサユニットは、TDGと加速度計演算部から構成される。計測は、削孔ロッド内に収納されたセンサユニットの上面を上向きにした状態で停止した後、XY-Gyroのローター軸を高速で回転させ計測モードに入る。その後、X加速度計、Y加速度計とTDGが、Z軸周りに筐体とともに回転し一定角度毎に n 回($2\pi/n$; n は2の倍数の自然数)停止しながら、XY平面内の地球自転角速度の水平、鉛直成分および傾斜角を計測する。計測された個々のデータにはセンサの固定誤差が含まれているが、1回ローテーションした n 個のデータを処理することにより、TDGや加速度計のバイアス誤差、スケールファクタ誤差を修正することができ、経年変化等の誤差成分などもキャンセルして高い精度で真方位を計測することが可能となる。さらに、TDGのコマは計測モードのときだけ回転動作するものであり、削孔推進中は休止状態となっている。このため、位置算出用の計測データは、削孔ロッドが地盤中を削孔推進する際に受ける衝撃などの外乱を直接受けることはない。また、耐衝撃性については、TDGが通電休止状態を基本に設計されている。

(3) 開発した小型ジャイロの方位検出誤差

TDGは、推進中の衝撃・振動などのない静止状態で測るものである。この条件における計測動作と、通電非計測時の耐振動性などについて、その基本仕様を表－1に示す。

表－1 小型ジャイロの基本仕様

項 目	仕 様
測定範囲	方位角 360°
	傾斜角(ピッチ) ±90°
	回転角(ロール) ±180°
計測精度	計測方位誤差 ±0.5°
	計測方位精度 0.35° (1 σ)
	緯度35°、基準角(ピッチ、ロール)±5°以内、静止時計測
	方位計測時間 150秒
温度	ピッチ/ロール ±0.3° (精度保証 ±15° 傾斜以内、静止時計測)
	センサユニット 0～50℃
保護等級	制御ユニット 0～50℃
	センサユニット
耐振動性(通電非計測時)	制御ユニット 4MPa耐水圧構造
	水中ケーブル
耐衝撃性(通電非計測時)	正弦波 5～11.1HZ 振幅1mm一定
	11.1～50HZ 4.9m/s ² 一定
耐衝撃性(通電非計測時)	前後方向 1000m/s ² 、3msec
	左右方向 150m/s ² 、6msec
	上下方向 150m/s ² 、6msec

方位検出データは、方位計測誤差±0.5度、方位計測精度0.35度(1 σ)であり、削孔用ロッド内に収まる小型装置としては、極めて高精度な装置である。しかし、100m削孔において±30cm以内の位置検出精度を得るためには、運用時に発生する誤差要因を排除する必要があり、実験を重ね対策を講じた。仕様でうたわれた誤差±0.5度を確保し、さらにこの誤差を小さくするためにとった方法の一部を以下に示す。

①初期方位誤差の補正

管理座標系の推進方向(通常Y軸方位)を基線方位とし、TDG固体毎に基線方位を現位置で計測し、使用する機器に合わせたY軸方位の座標を設定する。

②計測動作中の確実な静止

削孔ロッドは回転して掘削する。方位計測の度に削孔を一時停止した直後はロッドの振れが徐々に戻るため、計測前に振れを解消する操作を行う。

③掘削時環境変化の補正

温度特性、傾斜特性など使用環境で変化する固有特性を補正するオフセット機能を具備する。

④削孔ロッド内でのアライメント調整

削孔ロッド内部にジャイロ装置を平行にキープする位置決め機構がある。

5. 施工実績

5.1 供用中の危険物タンク基礎地盤耐震補強工事

(1) 工事概要

1977 年の消防法改正前に建設された特定屋外貯蔵タンク（以下、旧法タンク）3 基の基礎地盤の液状化対策を 2004 年 11 月から約 4 ヶ月間で実施した。

対象の旧法タンクの地盤及び基礎は、消防法の新基準を満足していたが、大規模地震に対する耐震性向上を目的とし実施された。表－2 に工事概要を示す。

表－2 工事概要

対象タンク	タンク内容	タール他
	公称容量	1400kL
	タンク内径	14.0m
	タンク数	3基
削孔本数		28本
削孔延長		1252m
曲率×曲線数		30mR×1ヶ所
改良深度		GL-3.3m～-8.3m
対象土量		4960m ³
使用薬液		エコシリカⅡ

(2) 曲がり削孔工法の適用

対象となる旧法タンク 3 基は他のタンクおよび防油堤に囲まれており、従来の直斜削孔では接続配管や他の施設の一部撤去が必要となるため、施工時にタンクの供用を一時停止する必要があった。また、未改良部が発生する可能性があることから、曲がり削孔工法による浸透固化処理工法が適用された。

図－8 に削孔および改良断面図を示す。施工ヤードは改良深度までのアプローチ長を確保するため、タンクヤードの外周道路に設置した。そのため、一部タ

ンクヤード側に仮設道路を設置し、削孔ライン上部を車両通行する状態で施工した。埋設供用管と機械配置の関係で計画深度を満たせない削孔機直近の改良部分は、直斜削孔にて補足注入を実施した。

本工事は、当時、日本では初めての危険物貯蔵タンク供用状態による施工であることから、施工中はタンク変位の動態観測を併用し慎重な施工を行った。全施工期間を通しての変位は計測誤差範囲の±2mm 以内に収まっており、タンクへの影響は無いことを確認した。

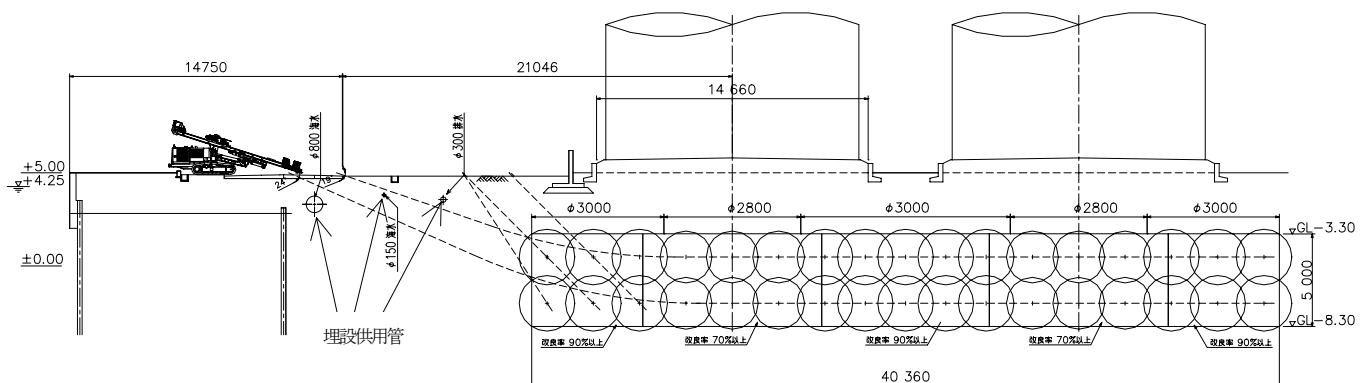
写真－4、5 に施工状況 1、2 を示す。



写真－4 施工状況 1



写真－5 施工状況 2



図－8 削孔および改良断面図

5.2 防潮水門耐震補強工事

(1) 工事概要

宮城県志津川湾に流入する八幡川の河口付近にある防潮水門の基礎地盤耐震補強工事である。平成17年4月から約6ヶ月間で実施した。志津川湾内には牡蠣やわかめの養殖場がある。このため、生態環境に配慮し、使用注入材は無機系材料を用い、さらに工事による水質汚濁は完全に防止する必要があった。

防潮水門は、約60m×19mの平面形状であり地盤にはφ350mmの基礎杭が200本存在した。1削孔長は約100m、削孔ラインと基礎杭の離隔は全て1m以下、最小では500mm以下であり、極めて高精度な位置検出技術と高い削孔誘導技術が必要であった。表-3に工事概要を図-9、10に改良平面図と改良断面図を示す。

写真-6は施工した防潮水門の全景である。

表-3 工事概要

削孔本数	24本
削孔延長	2316m
曲率×曲線数	30mR×1ヶ所
改良深度	EL-2.95m～-7.00m
対象土量	3956m ³
使用薬液	中性固化材

(2) 曲がり削孔工法の適用

従来の直斜削孔工法では、河川内水門躯体底盤に削孔穴を開ける必要がある他、河川内施工となるため汚濁拡散防止処置など多くの仮設備が必要となる。このことから、曲がり削孔工法による薬液注入工法が適用された。施工ヤードは、防潮水門の右岸に位置する運動公園に削孔機械を設置し、水門真横から基礎杭間24本を削孔し、中性固化材の割裂注入方式による液状化対策を実施した。写真-7に施工状況を示す。

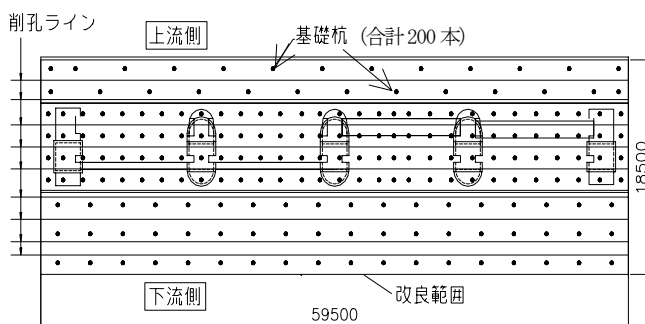


図-9 水門改良平面図

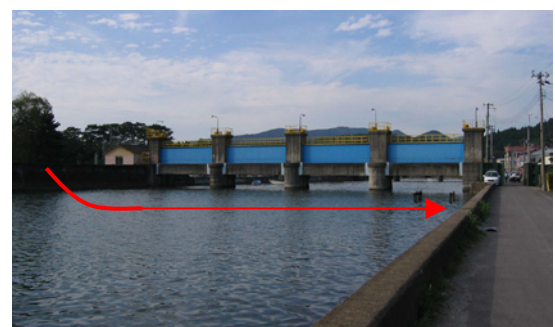
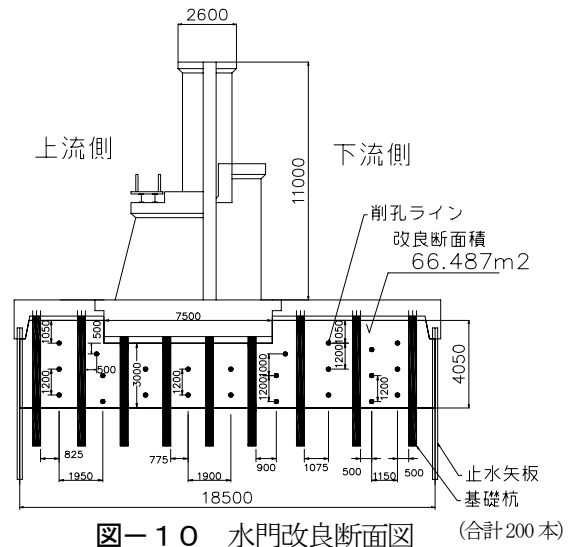


写真-6 防潮水門全景（下流から）



写真-7 施工状況（水門右岸）

6. まとめ

日本の沿岸地域には、空港施設や重要港湾、また発電施設など重要構造物が多く存在する。災害に強い国づくりが急がれる中、構造物の撤去や立坑構築など膨大な費用をかけずに、各種構造物を供用したまま地盤改良できるメリットは大きい。最後に、新小型ジャイロの開発に関して、多大なご協力をいただいた㈱トキメックの皆様に、本誌をかりて深く感謝の意を表します。