

## 削孔技術の現状と将来

Past and Future in the Development in Drilling Techniques

塩 井 幸 武 (しおい ゆきたけ)

東京湾横断道路(株) 技術部長

### 1. はじめに

人類は地球の地殻(厚さ約60km)の最上層の地盤上に建物や構造物を設置して社会活動, 経済活動を行っている。また, 地盤を掘削して地下室, 立坑, 地下鉄, 地下道, 下水道, 埋設管などを設けて生活の利便に供している。さらに, 地下に削孔して地下水, 熱水, 石油, 天然ガス, 鉱物資源などを取り出して生活に役立てたり, 石油やガスの地下備蓄, 下水の処理装置, 地下発電所, シェルターなどにも地下空間が利用される。これらの経済的な利用のほか, 地震調査や地殻調査などの学術的目的でも地殻への大深度の削孔をすることがある。

このように地殻に立脚し, 地下資源や地下空間を利用して生活していく上で削孔技術は広い分野で重要な役割を果たしている。古くは井戸や埋葬, 陥穽などのように人力によって掘削されたものが, 上総掘りなどのように道具を使い, 小さな穴を深くあける技術が現れたのは有史以降といわれているが, 定かなことはわかっていない。

本格的なボーリング機械によって削孔が始まったのは19世紀後半といわれ, その後, 地盤調査ボーリングとしても資源開発ボーリングとしても急速な進歩があった<sup>1)</sup>。地盤調査ボーリングとしてはサンプリングの技術, ボーリング孔を利用した調査法に著しい進歩がみられる。資源開発ボーリングは主として石油掘削の分野で発展が著しく, 掘削深度の伸びとともに未開発の油田が発見されて埋蔵量の拡大につながっている。石油関係のボーリング深度はアメリカのオクラホマ州で9583mというものがあり, 日本では新潟県下で5301mというものがある<sup>2)</sup>。学術ボーリングではソ連のコラ半島における12066mというものがある<sup>2)</sup>。10km掘削するのに約10年,

後の2kmに約4年を要している。このように超大深度のボーリングには多大の費用と時間が必要である。資源開発も大深度で行われることが多く, それに要する期間と費用は次第に莫大なものになってきている。

一方, 人類は地殻の表面で生活していくために, 建物, 道路, 鉄道, 送電線などの構造物を構築してきた。これらの構造物は地震, 洪水, 山崩れなどの自然災害に耐えられるように堅実な地盤や地層の上に強固な基礎を設けている。特に表面が軟弱層である場合には堅硬な支持層まで構造物に作用する荷重を杭やケーソンを介して伝達することになる。既製杭を用いる場合は打撃工法や振動圧入工法などで杭を施工できるが, それ以外の場合はなんらかの掘削または削孔作業を必要とする。居住地域での基礎の施工は騒音振動の規制が厳しく, そのほとんどが掘削, 削孔作業またはそれを併用する低振動, 低騒音工法によっている。

基礎のための削孔技術はヨーロッパにおいて20世紀初頭にケーシング挿入のためにボーリングしたシュトラウス杭などから始まった。日本では1950年代から1960年代初頭にかけてベノト杭, カルウエルド杭, リバースサーキュレーション杭がヨーロッパやアメリカから次々に導入され, 実用化されていった<sup>3)</sup>。日本独特のものとしてボーリング型式のBH杭が1960年代に生み出されている。

1967年に公害対策基本法が施行されると低振動, 低騒音工法への指向が強まり, 既製杭の施工には埋込み工法, セメントミルク工法, 中掘り工法等が併用されるようになった。これらの工法はいずれも削孔技術そのもので, その中心的役割を果たしているのがアースオーガーである。1953年にアメリカから導入されたが, その後, 国内で改良が加えられ, 各

## 総 説

種のアースオーガーに発展している<sup>3)</sup>。

一方、低公害化への動きは場所打ち杭の大径化の傾向も促進した。すなわち、本数の低減、工期の短縮などの利点があるためである。大径杭の削孔技術は深礎の大径化、オープンケーソンの自動掘削まで可能にするとともに、掘抜き井戸、立坑、換気坑の施工などにも応用されている。

場所打ち杭の発達とともに山留め工法や基礎工法として地中連続壁工法の利用も盛んになった。連続壁工法としてはイコス工法やソレタンシュ工法などが1960年前後にイタリアやフランスから導入された。その後、矩形の断面（エレメント）を主体とする連続壁工法は国内で独自の発展を遂げて多種多様の工法が生み出されている。さらに壁体を鉄筋コンクリートではなく、掘削時の泥水をそのままで固化させた泥水固化壁を山留めとして利用するところまで技術は進歩してきている。

## 2. 削孔技術の用途

地盤を対象とした削孔技術は今世紀になって急速な発達を遂げ、それぞれの利用目的に応じて多種多様な形態をとっている。これらの削孔技術を分類するのはむずかしいので削孔の形態に応じて適用されている対象を示したものが表-1である。

最も簡便な削孔方法はハンドオーガーによる人力ボーリングである。浅い沖積層の土質調査に利用される。

機械で単純に穿孔するだけでよいものにはロックアンカーやロックボルトなどの定着作業がある。ケーブルの定着、斜面崩壊防止、法面の安定、NATM工法などに多用される。

機械ボーリングは多方面で利用されている。地殻の調査のために1万mを超えるボーリングがロシア、アメリカ、ドイツなどで実施または計画されている<sup>2)</sup>。また、南極や北極などの厚い氷を数百、数千m掘って地球上の過去の環境変化を調べることも行われている。日本では首都圏の地震予知および地震調査のために3000m級の観測井4箇所が設置され、さらに12本の2000m級の観測井が計画されている<sup>4)</sup>。また、フィリピンプレートと日本列島の下への潜込みを調べるために高知沖の水深4800mの太平洋で750mの海底ボーリングを行った実績もあ

表-1 削孔技術の分類と用途

削孔の形態	適用対象
人力ボーリング (オーガーボーリング)	土質調査など
機械穿孔	ロックアンカー、ロックボルトなど
機械ボーリング (削孔空間の利用、試料採取など)	学術調査、地質調査、土質調査、地下資源探査、地下資源開発(石油、ガス、地熱、温泉など)、揚水、注水、地中観測、地下水観測、岩塩中の石油備蓄施設など
機械ボーリング (充填前提の削孔)	アースアンカー、ロックアンカー グラウト、凍結など
地盤掘削(置換、攪拌、混合)	地盤改良(アースオーガー、ジェット、高圧ジェット、アースドリル、攪拌翼など)、既製杭の低公害工法による施工(中掘り工法、高圧ジェット、セメントミルク工法、埋込み杭工法など)、鋼管矢板の低公害工法による施工、地すべり抑止杭
大径地盤掘削	場所打ち杭(オールケーシング、リバーササーキュレーション、アースドリル、BHなど)、PCケーソン、オープンケーソン、立坑(鉱山、シールド、換気、マンホールなど)、立型下水処理施設、廃物処理施設
帯状地盤掘削	地下連続壁、地中連続壁基礎、連壁杭、泥水固化壁、振動遮断壁、地下ダム

る<sup>5)</sup>。

地質調査、土質調査は構造物の建設、大規模掘削、軟弱地盤対策、地すべりや崩壊地対策、地下水調査など、地上に人工の手を加える事業のほとんどで実施されている。それによって地層構造、各層の工学的性質、地下水の状態などを知るところとなる。比較的浅いものが多く、100mを超すものは少ないが、関西新空港では400mに及ぶボーリングが実施されている。

地下資源探査、地下資源開発では大深度掘削のものが多い。鉱物資源の探査は採鉱や坑道などの方からあまり深いものとはならないが、石油や天然ガスでは前述のように数千mのものが多くなっている。地熱や温泉のボーリングも次第に深くなっており、地熱では3000m級の調査井が、温泉でも1880mのものが施工されている<sup>6)</sup>。

機械ボーリングの利用の仕方として揚水井は最も普遍的なものの一つである。地盤沈下防止のために揚水した水の一部を地盤中に戻すリリーフウェルや地熱発電の余剰熱水の地下環元のための環元井など

もある。

特殊なもので岩塩塊の中をボーリングした後に送水して岩塩を溶かして空洞を作り、その空洞に石油を備蓄するということがフランスなどで行われている。

以上はボーリングによる試料や空間を利用するものであるが、アースアンカー、ロックアンカー、グラウト、凍結管の配置などのために埋戻すことを前提としたボーリングもある。

それと類似するものとして地盤改良などのように地盤内に削孔するが、他の材料による置換、セメントなどとの攪拌、混合などによって直ちに埋戻されるという使い方もある。これらの工法は既製杭を低公害工法で施工するときの補助工法として応用できる。すなわち、削孔もしくは緩めた孔に既製杭を沈設するもので、孔は杭と置換えられたことになる。鋼管矢板の低公害工法による施工の場合も地すべり抑止杭の施工時にも同様のことが行われる。

削孔が大径化するとボーリングでは対応できない。場所打ち杭は大径の掘削機またはグラブで孔壁を泥水圧またはケーシングで保護しながら削孔し、水中コンクリートを充填して杭となすものである。BH杭は従来のボーリングと他の場所打ち杭の中間に位置する場所打ち杭である。

大径化したリバースサーキュレーション工法はPCウェルやオープンケーソンの自動掘削にも利用されている。大径化したリバースサーキュレーションの掘削機は立坑などの大径の掘削にも適用できる。また、縦型の下水処理装置の設置や放射能関係の廃棄物の埋設などにも利用することができる。

以上は円形の掘削孔が対象であったが、場所打ち杭の発達には地下連続壁工法の発展も促した。地下連続壁を閉合して基礎とする地中連続壁基礎、個々の断面（エレメント）を独立させて杭とする連壁杭、泥水固化壁も同工法の範疇である。振動遮断壁は地盤中の振動の伝達を遮断するための溝を剛体または軟質材で充填したもので、地下連続壁と同様の施工方法となる。地下ダムの止水壁も同様の方法で構築された不透水性の壁体である。

以上のとおり、削孔技術は広い分野で多様な使われ方をされているが、その代表的なものは機械ボーリングと場所打ち杭、地下連続壁工法である。その

内容を次に紹介する。

### 3. 機械ボーリング

機械ボーリングは図-1のように分類され、用途に応じて使い分けられる。

多くのボーリングは回転式（ロータリー式）のスピンドル型でハンドフィード、ハイドロリック（油圧式）フィードで実施されてきた。大深度の場合は先端駆動式（ダウンホール式）のターボドリル型とワイヤーライン工法の組合せが多い。近年になってロータリーパーカッション方式の先端駆動のものやまた水平ボーリングにおけるリバース工法などが実用化されている。その他の最新式ボーリングは実験段階のものが多いが、一部のものは実用化されつつある。

ボーリングでは泥水の果たす役割が大きい。元来、孔壁の保護、ビット刃先の冷却、掘りくずの搬送、ロッドの摩擦抵抗の低減などの役割を持ち、その品質はボーリングの目的や地質などによって大きく変化する。図-2は泥水を含む循環流体の種類を示し

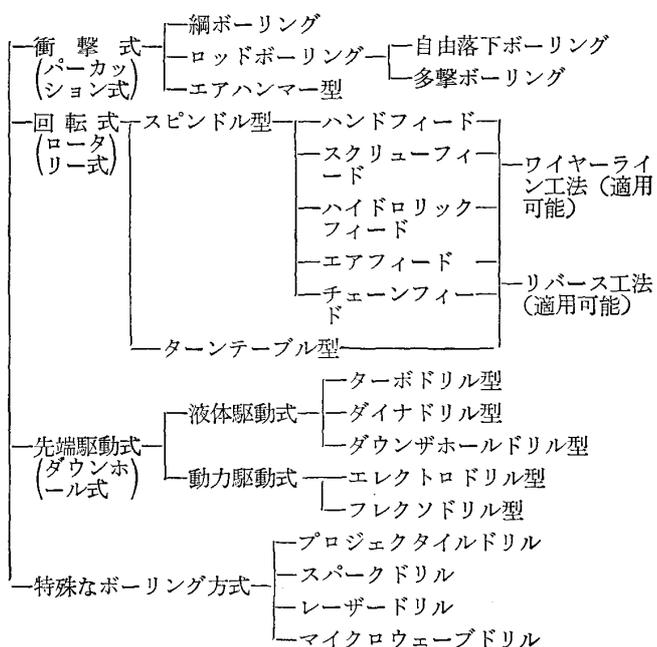


図-1 ボーリングの分類

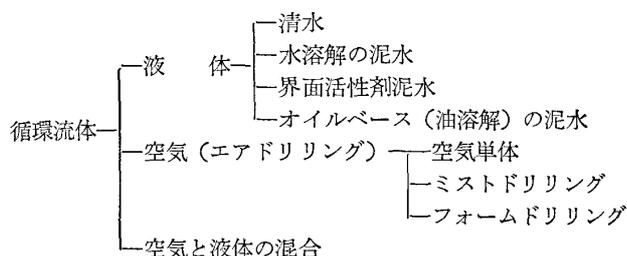


図-2 循環流体の種類

## 総 説

たものである<sup>9)</sup>。

清水は自然泥水のみによるものでボアホールテレビを使う場合などに用いられる。人工泥水は主にベントナイト泥水で、増粘剤や脱水調整剤が加えられる。強靱な孔壁を作るために分散剤またはポリマーと混合することもある。界面活性剤泥水はベントナイト泥水に潤滑油を加えたもので泥水の張付きを防ぐ効果がある。オイルベース泥水は膨張抑制力が大きく、高温度に対する安定性がよい。空気単体はリバー工法や先端駆動のものなどに使われる。空気と界面活性剤（ミストドリリング）や発泡剤（フォームドリリング）を加えた循環流体は試料の採取をやりやすくする。流体に空気を混入して静水圧を下げる方法、空気と高吸収性ポリマー液で孔壁保持、スライムの早期分離、容易な孔内洗浄を図る方法もある。

泥水の品質管理はボーリングの目的に応じて異なってくる。石油掘削の場合は泥水に溶解するガスの検出の妨げがないように、また油の噴出を泥水圧力で制御できるように管理するとともに高熱にも安定したものであることが求められる。地熱井の場合は高温に対する安定性が最も重要で、掘削途中の劣化を割水や調泥剤の添加などで調泥する。それと逸泥が課題である。防止のために比重の低減、空気混入泥水の採用、粘性の増強、逸泥防止剤の添加などの手段がとられる。逸泥問題を回避するためにエアドリリングを採用することもある<sup>9)</sup>。

調査ボーリングにあっては削孔技術以外にはコアバレル（サンプラー）の発達が目覚ましい。また、ボーリング孔を利用したボアホールテレビ、ボアホールスキャナーによる孔壁の観察やジオトモグラフィ（弾性波、比抵抗、レーダー）、比抵抗映像法などによる地盤構造の調査技術も著しく発展している<sup>10)</sup>。ボーリングをしながら機械のトルク、推力、送水圧などや孔底温度、地層のガンマー線、比抵抗などの連続記録から地盤の性状を判定する技術やボーリングの掘削抵抗から地盤強度を推定するロータリーサウンディング法なども開発されている<sup>11)</sup>。

削孔技術に限定すると機械の軽量化、ビットの交換システム（例、リトラクタブルビットシステム）、コントロールドリリングなどの技術にかなりの進歩がみられる。また、海底ボーリングを中心に自動ボ

ーリングの技術がいくつかの形態（パイプロ式、ロータリー式、ジャッキ推進式など）について研究開発中で、一部のものは浅層の掘削で実用可能になっている<sup>12)</sup>。

このように機械ボーリングの技術はその周辺技術も含めて徐々にではあるが、大きく変化しつつある。

## 4. 場所打ち杭, 地下連続壁

機械ボーリングの径が大きくなると削孔技術は場所打ち杭の工法へ移行する。場所打ち杭を工法別に分類すると図-3のようになる。

オールケーシング工法はボーリングのケーシングを拡張したようなものであるが、削孔には泥水は用いられない。リバーサーキュレーション工法（リバー工法）は掘削孔内の自然泥水とその水頭差（2m以上）で孔壁を保持しながら削孔するのが原理である（図-4）。

すなわち、在来地盤の微粒子の自然泥水は孔内の水頭のために在来地盤中に浸透しようとするときに孔壁面で滲過されて微粒子は表面に取残されて泥水膜を形成する。泥水膜は難透水性であるために表面に水頭差に相当する圧力が作用して孔壁を保持する。この圧力は $0.2\text{kgf/cm}^2$ 程度ではあるが、図-5に示すとおり、地盤中のアーチ作用によって大きな地圧にも対抗することができる<sup>13)</sup>。図中の式が示すよ

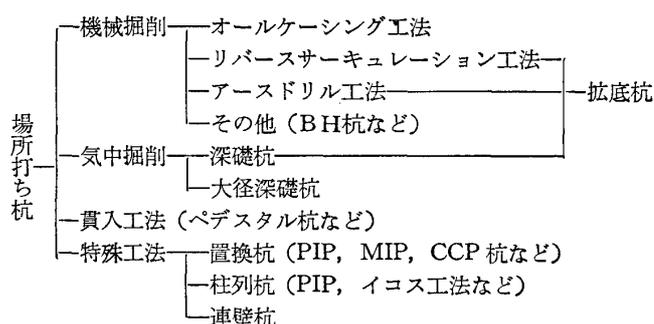


図-3 場所打ち杭工法の分類

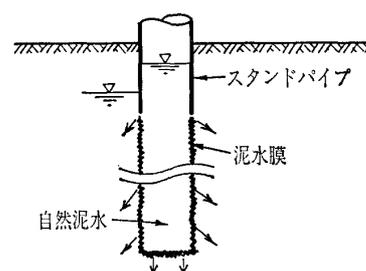
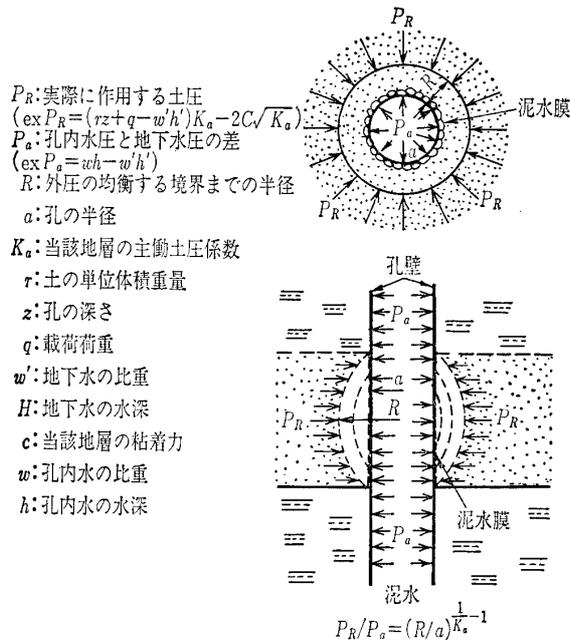
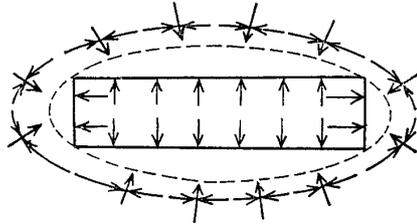


図-4 リバー工法の原理



図一五 泥水による孔壁保持のメカニズム



図一六 エレメントのまわりの作用力のバランス

うに泥水圧によるアーチの効果は孔径が大きくなるほど小さくなるので大径になるほど崩落が起こりやすくなる。泥水の循環もサクシオンポンプでは70m程度が限界となるために先端に水中ポンプを内蔵する掘削機が必要となる。

アースドリル工法はベントナイトやポリマーなどの人工泥水で孔壁を保持しながら掘削する。原理はリバース工法と共通であるが、自然泥水の比重が1.03程度であるのに対して人工泥水の比重は1.10程度であることから深くなるに従って差圧が大きくなって安定性が増す。この工法では掘削土にベントナイトなどが混じるために産業廃棄物として処理することが多い。

連続杭は地下連続壁のエレメントを杭としたもので、その掘削は地下連続壁と同様である。掘削にはクラムシェルバケット、多軸回転ビットなどの容量の大きい掘削機または排出量の大きいリバース式掘削機を用い、孔壁を人工泥水で保持しながら削溝する。工法の原理はリバース杭に準じるが、掘削溝が長方形であるためアーチ作用が効きにくい。それで

も図一六に示すように長辺、短辺に沿ってアーチ作用が生じ、地質の良くないときはエレメント長を短くにとって対応する。

地下連続壁、リバース杭、アースドリル杭などのように泥水圧で孔壁を保持するものは軟弱層のようにはらみ出す地層にはケーシングまたは地盤改良を必要とする。また、逸水層や被圧地下水層では崩壊の危険を伴うので水位管理は重要である。

## 5. 削孔技術の今後

削孔技術の発達は人類に多くの恩恵をもたらしたが、今後もますます多くのことが求められていくことになる。一方、作業員の不足、高齢化のために合理化、省力化も求められている。

機械ボーリングの分野では大深度掘削と高速施工のために耐摩耗性のビットへの改良、ロッドハンドリングの簡素化またはワイヤーライン工法の改善、ビット交換装置の合理化、サンプラーの交換の迅速化、ボーリングの方向制御技術の向上など、数多くの課題がある。また、大深度になると地層が高熱となるために耐熱性のビット、ケーシング、泥水の配合などの面での技術開発と、地圧が大きくなるためにコアが輪切り状に破断するのを防ぐサンプラーの考案なども課題である。

高速化にはパーカッション系のノンコアボーリングが有利となるが、排出されるスライムを含む泥水やボーリング機械の操作データなどから精度のよい地盤情報が得られるシステムの開発も価値をもつであろう。この手法はMWD (Measurement While Drilling) 法に通じ、各種の施工中の情報がパソコンなどに収録され、必要に応じて情報解析がされる。コンピューターを使ったリアルタイムの解析は今後の技術の中心課題になっていこう。

省力化で期待されるのは自動ボーリングである。それは海底ボーリングの一部で実用化されているが、陸上部でも各種の施工データを収納する人工頭脳(AI)システムで最適条件を探して自動制御で掘進できることが期待される。深海底のボーリングではどうしても必要になってくると考えられる。省力化でもう一つ必要なのはボーリング機械やケーシング等の機器の軽量化である。エアドリリングの採用などで小型機械での施工も可能になっているが、母材

## 総 説

の材質の軽量化も必要であろう。

この外、人工泥水の品質の向上、すなわち安定性、耐候性、耐熱性、低粘性、軽比重、潤滑性、早期分離、容易な清浄化、難逸水性など使用目的に応じて種々の性能が要求され、ときには相矛盾する性能も合わせて要求されることもあるので、この方面の研究も重要である。

その外、図-1の特殊なボーリング方式の開発、セメンチングのように各目的ごとに必要な技術の開発も進んでいこう。

これらの技術開発とともに経済性の追求も不可欠である。合理化、標準化、互換性などの面でも努力が求められよう。

場所打ち杭については工法の多様化しているところはあるが、大きな変化はみられない。それでも泥水や残土の処理、掘削機の高さの制限、玉石層の掘削など、自主的な努力は重ねられている。いずれ、掘削技術は長尺化、大径化の課題を克服する方向へ向かうものと考えられる。

地下連続壁工法は建築分野では割高感もあり、一時ほど使われないが、土木の分野では地中連続壁基礎、連壁杭、立坑などと適用範囲が広がりつつある。東京湾横断道路では海中に内径98m、厚さ2.8m、長さ119mの仮締切工、大阪では深さ150mのエレメントの試験掘削に成功している。現在の課題は先行エレメントと後行エレメントの接続部の一体化を前提にした掘削方法で、完全なものが出現したと言いがたいのが現状である。

この外、泥水固化壁のように新しい材料で壁を形成することも研究の対象となろう。

削孔技術の将来については以上のとおり、不透明のところも多いが、広範囲にわたり新しい技術開発がなされており、10年後の姿が楽しみである。

本文の作成にあたっては国土開発技術研究センターの桑原啓三氏、建設省土木研究所の中村康夫氏より懇切丁寧な御教示と御協力を得た。ここに両氏をはじめ、御指導いただいた方々に厚くお礼を申し上げます。

## 参 考 文 献

- 1) 土質工学会編：土質調査法，pp.127～130，1982.
- 2) 田中彰一：掘削技術—陸上學術ボーリング，地球，Vol.10，No.3，pp.206～211，1988.
- 3) 土質工学会編：杭基礎の設計法とその解説，pp.13～24，1985.
- 4) 岡田義光：首都圏直下型地震の予知に向けて—広域深部観測施設の整備計画—，防災科学技術，No.70，pp.5～12，1992.
- 5) 平 朝彦：日本列島の誕生，岩波新書148，p.17，1990.
- 6) 金原啓司：地熱ボーリング—陸上學術ボーリング，地球，Vol.10，No.4，pp.232～236，1988.
- 7) 桑原啓三：最近のボーリング技術，地質と調査，1987年第4号，pp.2～7，1987.
- 8) 桑原啓三：ボーリングの新しい技術，地質と調査，1993年第1号，pp.9～13，1993.
- 9) 中村昭一：地熱井のさく井ボーリング，地質と調査，1984年第4号，pp.2～9，1984.
- 10) 深田淳夫：地質調査の新しい技術，地質と調査，1993年第1号，pp.2～4，1993.
- 11) 西田 弘：最近のボーリング技術，基礎工，Vol.18，No.10，p.38，1990.
- 12) 山田正俊：ボーリングによる海底地盤調査，地質と調査，1982年第4号，1982.
- 13) 吉田 巖・青木重雄・塩井幸武：場所打ちグイの施工，橋梁と基礎，7-1，p.4，1973.

(原稿受理 1993.5.14)