底置式海底ボーリングによる地質情報について

—— 簡易装置を用いた調査法の開発 ——

小島圭二*・田中彰一*・佐藤光夫*・斎藤保祐*

How to Get Geotechnical Informations Making Use of Submarine Drills

— Development of Investigation Methods with a Simple Device —

By K. KOJIMA, S. TANAKA, M. SATO, Y. SAITO

Abstract

In this paper, we describe some experimental studies of investigation methods for submarine drills. The experiments were tried with a simple one-bit-run type electrodrill built as a trial in the writers' laboratory.

Mainly two methods are available to get some geotechnical informations making use of these drills. One important method is concerned with core sampling and testing. A rubber sleeve sampler was designed in order to get undisturbed and high recovery cores efficiently in a process of submarine drilling and "double sleeve cores" were obtained. The unique core test system with these cores including X ray radiography, triaxial compression test and ultrasonic velocity measurement was tried and the value for practical usage was well recognized.

The other method is concerned with drilling response. Some measurements for submarine drills were tried in situ. This method is so to speak mechanical logging or sounding. Strength of the foundation can be correlated from penetration rate and coefficient of deformation is estimated from the strength by mutual relation in the soil to soft rock foundation. This value shows only a kind of index for mechanical properties in the hard rock foundation. But this method becomes a very useful especially in weathered or fractured rock foundation which little cores can be obtained.

まえがき

海洋構造物の建設件数の増加、規模の大型化および対象水深の増大にともない、海底地盤調査の必要性や精度に対する要求も増加の一途をたどっている。これに伴い、ボーリング調査の方法も、とくにめざましい発展が見られる建設作業用の脚昇降式、半潜水式などの移動足場や、ボーリング用の円筒式足場などの海上作業台からのボーリング方式から、掘削装置全体を海底におろし船上から遠隔操作によって作動させる底置式のボーリング機器に至る種々の方式が考案、実用化されている。²⁾ 本論で述べる底置式ボーリングに関しては、初期のものは one bit run 方式で海底下数 m のコアを採取するものであったが、最近のロッド自動継手や海中作動機器の発展にともなって、海底下数 10 m の深度までコアが採取できる大型機器の開発が、とくに北海の石油生産施設の建

設に関して盛んになり、フランス I.F.P. の Submarine electro-corer³⁾ やスウェーデン Atlas Copco の Maricore⁴⁾ など数機種が実用化されつつある。

この底置式ボーリングの方式は、海底ボーリング経費のほとんどをしめる作業足場がいらないこと、機器の移動が容易で海底地盤の性質の面的拡がりを経短期間で調査できること、とくに水深の深いところでは他の方式にくらべてはるかに有利であるなどの特徴がある。このため多額の経費を投入しにくい概略調査段階の手段としての発展性が期待され、我国においても運輸省の港湾技術研究所や機械振興協会による試作をはじめ計画中のものも含めて数機種の開発が進められている。

しかしながら、この種の機器は一般に製作費が高い点は別としても、遠隔操作にたよるか、せいぜい一部をダイバーの手にたよるほかはオペレータの手が使えない点海上作業とくらべ得られる地質情報にもかなりの制約が生じる。きめの細かいサンプリングや標準貫入試験・物理検層・プレッショメータなどの孔内試験が困難である

* 東京大学 工学部資源開発工学科

など地質情報に関する事項だけを考えても、精度の良い諸工學量を要求される地盤調査には、とくにきびしい制約となる。それ故削孔装置としての機器の開発もさることながら、上記のような条件下でいかに効率の良い地質情報を得るかも、もう一つの重要な問題である。

筆者等の研究室では、簡易型の底置き海底ボーリング装置（簡易海底ボーリング装置）を試作し、エレクトロドリルを用いた底置きボーリング装置の基本型の開発をおこなっているが、その一環として効率良く地質情報を得る方法の基礎的な実験をおこなってきた。本論ではこれらの実験を通じて底置きボーリング機器を用いた調査システムの考察をおこなうことにする。もちろんここで用いた機器は海底下 1m までの地質情報しか得られない、one bit run 方式のものであり、海底下数 10m の地質情報を目ざす本格的な機器に適用するには、なお種々の創意、改良が必要であり、目下その面の開発を進めている段階である。

なお簡易海底ボーリング装置の製作および実験費の一部は、昭和 46 年、48 年の文部省科学研究費補助金によるものであり、海底実験資料は、東京大学海洋研の調査船“淡青丸”による東京湾相模湾における実験、三井海洋開発 K.K. の SEP “たまの” による沖縄県本部沖における実験などにより得られたものである。

図-1 簡易海底ボーリング装置全体の構造図

また、これらの諸実験に御協力いただいた上記関係機関の諸氏および機器の製作改良に尽力された塚本精機（株）の諸氏に感謝の意を表します。

1. 簡易海底ボーリング装置

実験に用いた簡易海底ボーリング装置の構成を図-1 および 図-2 に示す。また海中機器の概観を 写真-1 に示す。この装置は船からワイヤーロープで昇降される底置きボーリング機器で、小型・簡略化をはかるためエレクトロドリル方式が採用されている。海中機器はモータ（出力 3.7 kw, 回転数 670/850 rpm, 外径 20 cm, 長さ

図-2 船上における装置の配置図

写真-1 簡易海底ボーリング装置の降下作業

140 cm, 重量 250 kg), コアバレル, ビットが一体となったエレクトロドリル本体とこれを支える支持脚, ドリルの昇降と掘進速度を制御する水圧シリンダ, 掘削水を送るポンプなどからなり総重量約 600 kg である。そしてモータの作動をモニタする回転計が取付けられている。船上機器は三相電源 (220 V, 25 A) と電源制御盤, 水圧シリンダを動かす空気水タンクとコンプレッサ (最高圧 7 kg/cm²) および電源ケーブル, 水圧ホース (各 400 m) とそのウインチなどからなる。また稼動水深は 250 m まで, 掘削深度は前述のように one bit run 方式で約 1 m である。¹¹⁾

2. ボーリングコアによる地質情報

底置式海底ボーリングは, まえがきでも述べたように, 仮設費を軽減し, 短時間で何本も削孔できる移動性に着目した機器であるから, その反面従来の, きめの細かいサンプリングに基づくコア試験や孔内諸試験を加えた地盤評価は困難である。それ故地質情報の大部分は, ともかくも得られたコアに依存することになり, 1 回の降下作業により, できるだけ乱さない試料を確実に採取できるサンブラと, 得られたコアを有効に利用する試験法とがとくに要求される。ここでは以上の観点から開発した, エレクトロドリルを用いたゴムスリーブサンブラとコアの試験システムについて述べることにする。

2.1 ゴムスリーブサンブラ

このサンブラはビットやコアエッジを換えることによって, 土から硬岩に至る試料採取を目標に作られたもので, コアはゴムスリーブに包まれながら採取されるのでゴムスリーブサンブラと呼ぶことにする。

サンブラは 図-3 に示すように, 三重管式で内管にはゴムスリーブが装填される。ゴムスリーブは二重に折って内側の端を内管の下端に固定する。外側の端は多少延ばして内管内側に折込み, ゴムスリーブヘッドに固定する。このヘッドには吊りワイヤーが結ばれており固定ピストンの役割りをするから, 掘進につれてゴムスリーブがめくられてコアを包む。回転は上部の軸からスイベルに伝えられ外管のみをまわす。2 個のローラベアリングを介したスイベルの内側はゴムスリーブの回転を完全に止めるため, 逆ねじパイプを通して外の系に止めるようにしてある。掘削水はスイベル部で外管と中管の間へ導かれ, ビットの孔を通して放出される。実験に用いたビットは段付きメタルクラウン型で, 土～軟岩には写真-4 のようにカッティングエッジ先端がビットの刃先より突出したものを用いられる。軟岩～硬岩には逆にわずかに刃先より内に入ったものを用いられる。コアは二重のゴ

図-3 ゴムスリーブ・サンブラ組立図

ムスリーブに包まれて内管に採取され, 写真-2 のような状態で取り出される。これを二重スリーブコアと呼ぶことにする。このスリーブによって内管との摩擦によるコアの乱れが防がれ, 同時にコアキャッチャーの役割りもはたされる。スリーブの径は約 50 mm, 肉厚は外膜

写真-2 二重スリーブコア

0.12 mm, 内膜 0.02 mm 程度で, 長さは約 1 m である。

また海底表層の含水比の高い未固結砂などでは, コアが流出, 脱落しやすいため, 必要に応じてコアエッジと内管の間に密閉機構を取付けられるようにしてある。これは 8 枚の金属の爪をゴムモールド製円筒の先に取付けたものを中管先端に設置, 船上から水圧ホースを通じてこのゴム円筒を加圧し爪を押出して, コアを切りながら密閉するものである。

2.2 コア採取実験

室内・野外陸上部および海底で, 簡易海底ボーリング装置とゴムスリーブサンプラーによるコア採取実験をおこなった。

室内試験に用いた試料は, 主として河砂に少量 (3~5 重量 %) のセメントを混入した人工砂層で, 木ワクに入れて養生し, そのまま掘削実験に用いた。河砂の粒度は 50% 粒径: 0.32 mm, 最大粒径: 4.76 mm, 0.074 mm 以下の泥分: 3~5%, 均等係数 3.0, 曲率係数 1.1 程度の小礫混りの比較的粒のそろった細砂で, 最もコア採取がむずかしい部類に属する。この他に同様に作った, 最大粒径 20 mm の人工礫層, 房州石 (スコリア凝灰岩) を砕いて粘土を間にはさんだ人工弱層および各種石材などが実験に用いられた。

コア採取率に関しては, 人工砂層ではコアエッジをビット双先より 3~5 mm 出して採取されたが, ほぼ 100% の採取率が得られた。人工礫層では, マトリックスがほとんど流された。これは最大粒径 20 mm に対してコア径が 50 mm と小さかったことおよびコアエッジの出し方が短かったなどが推定された。また人工弱層は前述した硬岩タイプのビットで実験をおこなったが, 割目の間の粘土は層が薄い上に, ビットとコアエッジの芯が多少ずれる機械的ミスが生じたため, 乱れが認められたが, 岩盤中での全体の構成は保たれたまま採取され, 多少改良をすれば厚い弱層の不攪乱コア採取の見通しが得られた。⁶⁾

採取された砂のコアについて, 圧縮試験と後述する X 線写真によって乱れの影響を調べた。写真-3 は X 線でみたコアの乱れの状況で, セメント 3% 混入河砂 (一軸圧縮強度 1 kg/cm^2 弱) の例である。(1) は X 線では不攪乱と判定されるもの, (2) は写真-5 からわかる通り, コア中所々に生じている引張り割目で, 採取時の掘進速度の急激な変化やコア引抜時などに生じるものであろう。(3) は形状がくずれた形で採取された部分である。なおせん断による局所破壊や変形は見つけにくい。これら各段階のコア幾つかについて一軸圧縮試験をおこない, それぞれに対応する削孔周辺のブロックを切出し

写真-3 X線写真によるコアの乱れの状況 (セメント 3% 混入河砂), (1) 不攪乱, (2) (3) 攪乱

整形した試料と比較検討をした。図-4 は (1) の状態のコアの例で, この場合不攪乱とみられる削孔後の木ワク内からの整形試料に比べ, 圧縮強度で 3 割程度, 弾性係数で 4 割程度の減少が認められる。同様に (2) の段階のうち割目が少ないもので, 強度で 4 割, 弾性係数で 7~8 割の減少が認められた。(3) の段階のものは試験のための整形不能である。(1) の段階のコアにも上記のような乱れが認められることは決して満足すべき状態ではないが, 通常の方法ではコア採取もむずかしい試料であることを考慮すると, ほぼ確実に採取され, この程度の試験ができれば一応の成果が得られたものと判断される。なお圧縮強度 数 kg/cm^2 以上の人工砂層については, X 線

図-4 二重スリーブコアの攪乱状況 (セメント 3% 混入河砂の例)

写真や三軸圧縮試験などから判断して、上記(1)の段階ではほとんど乱れが生じていないと考えられる。

野外陸上部での試験は、船橋市の海岸埋立地でおこなった。採取された土質は、50% 粒径 0.25 mm, 0.074 mm 以下の泥分 3%, 均等係数 2.73, 曲率係数 0.68 の粒のそろった貝片混り細砂が主で、一部貝殻を含む泥の層をはさんでいる。礫に当り掘進速度が急変した部分に乱れを生じたが、コア採取率は100%で試験に耐えるコアが得られた。その1部を図-5に示す。

海底実験はまえがきで述べた施設・地点でおこなわれた。しかし実験に用いた装置で採取可能な海底下1mまでの底質は、東京湾・相模湾では軟弱泥、沖縄ではサンゴ砂と高含水の未団結層で流動しやすく、ほとんどコアは得られなかった。このように極端に軟弱な地層に対しては主に軟岩用に作った既存のコアエッジでは刃先をビットより5mmしか出せないためこれをもっと長くする

こと、流動を防ぐには密閉機構が必要であるなどの対策が考えられる。沖縄のサンゴ砂については、この密閉機構の作動には成功したが、長いエッジの製作が間に合わず結局サンゴの遺骸と一部のマトリックスを密閉採取したのみで完全コアは得られなかった。また大きなサンゴ塊につき当たった場合、全体としてはやわらかい地層にもかかわらず、土用のエッジでは掘進できず、サンゴ礁掘進のむずかしさを痛感した。密閉式サンブラによるサンゴ砂採取直後の密閉状況を写真-4に示す。

写真-4 密閉式サンブラ先端の金属爪（サンゴ砂密閉採取直後の状況）

図-5 船橋埋立地で採取された二重スリーブコアのX線写真とフィルム濃度 (Fd)

なお以上の実験を通じて、この種サンブラによるコアのとり方としては、コアエッジ附近での乱れや引張りによる割目を生じないため、できるだけ定速で掘進し、芯ぶれを含む機械振動による乱れを防ぐため急速な掘進とこれにともなう適切な送水をおこなうこと、また機器に関しては礫や割目の多い岩を採取するにはコア径 50 mm は小さく、100 mm 程度にすること、硬岩用ビットにはコアエッジ附近の中管と外管の間にスラストベアリングを入れるなどの芯ぶれ防止機構をつけることなど幾つかの改良点が見出された。

2.3 二重スリーブコアの特徴と試験システム

ゴムスリーブサンブラによって得られた二重スリーブコアの外膜は試料の抜取り・運搬・整形時の破損を防ぐ役割りをし、内膜はそのままコア試験に供することを目的とする。採取されたコアはゴムスリーブの端をもって引張れば、サンブラから簡単に抜取られそのまま箱に収納できる。その際に二つ割りの塩ビ管などをあてがうことにより曲げによるコアの破損が防止される。またゴムスリーブの両端をひもなどで密閉することで、水分の逸

散も簡単に防止され、ろう付けなどのわずらわしさがない。以上の特徴によって、従来のダブルコアチューブな

どに見られる上記工程での欠点が解決された。

コア試験に関しては、シンウォールチューブなどコアが金属管内に採取されるサンプルでは、コアを拔出してみなければ岩相が観察できず、試験個所の岩相を室内試験時まで知ることができない。このため現場での地質断面の判断や調査計画に不便な面が多いなどの欠点があった。ゴムスリーブの場合には密度差の少ない物質のコントラストが得られるソフト X 線の使用が可能であり、ゴムをはがさずに X 線写真から間接的に岩相の観察ができ、上記の欠点が覆えるばかりでなく、むしろ直接観察では見落とし易い面が強調される場合も多い。(金属管のかわりにプラスチック管を用いれば従来の方式にも適要できる。) とくにコア試験個所の選定に当っては、不撓乱の同一岩相部のみを適確にとり出せる利点は大きく(写真-5)、割目の頻度やステレオ撮影を併用した方向性の計測も可能である。また 図-5 に示すように濃度計を用いてコアの X 線写真のフィルム濃度を測定し、これが密度に比例することからコアの物理量を求め得る⁶⁾ など、これまでに測定しにくかった諸性質をスリーブをはがすことなく得ることができる。X 線写真は野外用装置を使って現場で簡単に撮影でき、その場で約 10 秒で現像できる感光紙も開発されている。^{*}

また試料の整形に当っては、とかくコアが破損しやすいが、二重スリーブコアでは外膜で防護されたまま端面整形をおこない諸試験に供することができ、整形時の破損によるコアの損出が防がれる。これは上記コア試験個所の選定と合せて、三軸圧縮試験にはとくに便利である(写真-6)。また測定できなかった軟質コアの超音波速度

写真-5 X線写真を使った二重スリーブコアからの供試体の選定 (1~4) (セメント 5% 混入河砂)

(5) は比較試験用、結果は 表-1 に示す。

写真-6 二重スリーブコアの三軸室装填 (外膜を切りはなすところ)

^{*} 例えば Kodak Industrex Instant 600 Paper

写真-7 “二重スリーブコア”の超音波伝播速度測定状況とその記録

図-6 地盤調査における“ゴムスリーブ・サンプル”の試験システム

もゴムスリーブのまま測定できる利点もある（写真-7）。

以上の特徴を生かした、二重スリーブコアの試験システムの1例を図-6に示す。図の上半部は、船上で直ちに計測可能なもの、下半部はコアの室内試験に待つ部分である。前者ではX線写真を中心に、船上でコアの状態を変えることなく地質の構成や物理量を知り、音波探査記録などの既存資料と現地で比較検討しながらきめの細かい調査も可能である。後者では、前述のような二重スリーブコアの特徴が生かされた各種試験が実施される。これによる三軸試験を中心とした一連の試験結果を表-1に示す。試験はセメント5%混入の人工砂層から採取さ

表-1 二重スリーブコアの試験結果の1例、試料番号No. 1~5は写真-5の番号にそれぞれ対応する

No. of Plate 4	σ_3 kg/cm ²	$\sigma_1 - \sigma_3$ kg/cm ²	C, ϕ kg/cm ²	density g/cm ³	V_p m/sec	Fd/x cm ⁻¹
1	0	10.0	1.6, 38°	1.71		0.72
2	8	35.8		1.76		0.62
3	5	25.1		1.75	1500	0.67
4	2	14.3		1.75	1290	0.67
5	—	—		—	1310	—

れたもので、試料番号は（1）～（5）写真-5の（1）～（5）の供試体に対応し、X線写真による試験個所の選定も適切であったことを示す。

2.4 ゴムスリーブサンプラの適応性

以上のように、ゴムスリーブサンプラは、いわば従来のデニソン型サンプラとロータリーホイールサンプラの中間型で、ゴムスリーブはめくられる際のまさつ抵抗を考えるとせいぜい2m程度までで、ロータリーホイールほど長くできないが、はるかに機構が簡単であり、採取後のコアの処理も容易である。この点ではデニソン型サンプラにみられる金属性のサンプルチューブをゴムスリーブにおきかえて、コア試験を便利にしたものといえる。ただ、逆ねじパイプや吊りワイヤーによる内管やピストンの固定がはんざつであるが、これは先端駆動型で、ロッドの回転を伴わないエレクトロドリル方式では容易に解決され、このサンプラの特徴となっている。この種機

器では、孔内にモーターを挿入していく方式の削孔が本来であるが、海底ボーリングでは、孔径が大きく（現在使用しているドリルで 20 cmφ）、海水掘りでしかもケーシング挿入が困難であるため、海底表層の削孔では機器抑留のおそれが大であるため、なかなか踏み切れないのが現状であり、試料採取度を増しにくい。

しかしこのゴムスリーブサンプラーを、従来のロッドで回転を伝えるロータリー方式で使用する場合、とくに自動継手を考える場合、現状のままでは操作が複雑すぎ、この点に改良の余地がある。さらに自動継手をもつ機器では、採取されたサンプルの引揚げには、海底下数 10 m の削孔でも、ロッドの揚降による従来の方式より、ワイヤーライン方式の方が数倍作業工程が早いと考えられるため、これらの点のみ考えれば、デニソン型のサンプラーの方が機構が簡単で扱いやすい。

しかしコア試験値に頼るところが多く、また移動性に重きを置く底置き式海底ボーリングでは、サンプリング、コアの抜き取り、観察、保存、などの前処理や試験室における整形試験など一連の操作が簡単で、しかも無駄なくコアを試験できることが、他の方式よりも一層望まれる。このような試験工程に関しては、二重スリーブコアは、他にくらべはるかに効率よく、確実に作業が進められることが期待される。それ故、それぞれのサンプラーに長所・短所があるのは当然として、一連の試験システムとして考えた場合には、ゴムスリーブサンプラーが大いに活用されることが期待される。

3. 掘進状況による地質情報

底置き式海底ボーリングにより得られるもう一つの地質情報は、掘進状況に関するものである。この方法は 1 種のサウンディングであり、コア試験では完全に評価できない地盤としての性質を、ビットと孔底地質との相互作用からとらえ、これを深度に対して連続的に測定し、力学量との相関を求めようとするものである。

掘進記録は、ブレードビットなどを用いたノンコアボーリングによる方法とコア採取の際について得る方法とがある。前者の場合は地質情報を得るための掘り方ができ、またサウンディング専用機とすれば装置自体もかなり簡略化され短時間に比較的簡単な操作で力学量が推定されるが、コア試験にみられるような情報の多様性が失われる。逆に後者ではサンプリングに適した掘進条件が優先するから、掘進記録による情報が制約される。

ここでは、確実な情報を得て地質との相関を追求するため、まず前者の立場をとり、後者への適応性を合せ考察することにする。

3.1 掘進記録と地盤の性質

削孔中に得られる掘進情報は、掘進長および速度（掘進率）・トルク・給圧（ビット荷重）・回転数・送水ポンプの圧と送水量および掘削水の性質などの諸量である。

地質情報は掘進速度（掘進率）やトルクに反映され、他の諸条件を一定にしたときのビット荷重との関係から力学量が推定される。図-7 は掘進速度とビット荷重の一般的関係を示したものである。概念的に言えば①はビット荷重の増加に対して掘進速度の増加が小さい範囲で、すりへらしによる掘進が、②は掘進率の増加が大きく、ビット荷重に対してほぼ直線になる範囲で、孔底破壊を伴う掘進がおこなわれ、③に至って掘削水によるスライムの除去がまにあわずはりつきを起すなど掘進率が減少するものと思われる。したがって①から②の領域への変換点のビット荷重は、地盤の強度に直接関係づけられると予想される。この変換点は通常図の W_c/D (W_c は②直線の X 軸切片に相当するビット荷重、 D はビット径) であらわされる。これはいわば孔底の極限支持力に相当する。そして掘進条件が同じでもこの曲線は図-10 のように岩質や強度など岩の性質によって異なり、岩の強度が増すと W_c/D も増加する。またビット荷重が一定のとき、掘進速度 R が大きいほど、 R が一定のときは W が小のほど岩は軟かい。なお図の N は回転数で、 R/N は 1 回転当りの掘進長をあらわす。

ロータリー掘削における孔底の破壊機構は複雑であるが、Robinson (1958) によると、清水掘の場合掘進速度は三軸試験における破壊強度（最大軸差応力）に直接関

図-7 ビット荷重と掘進速度の一般的関係

図-8 東京湾周辺地盤の強度と W_c/S の関係 (室内試験, 46 mmφ 三枚羽ブレードビット)

係し、砂泥岩のような多孔質岩石では孔底近傍 (孔底岩石の掘削は 1 回転当たりせいぜい数 mm である) での周圧 σ_3 と孔底地盤の間隙水圧 u とがほぼ等しい状態となり、この場合三軸試験における軸差応力は σ_3 によってほとんど変らない。^{*} 従って孔底の破壊は主としてせん断によるとすると、掘進速度は内部摩擦角 ϕ の要素に関係なく、粘着力要素 C (または qu) に関するものと考えられる。以上のような見解に基いて、強度の代表としての一軸圧縮強度 qu と、 W_c/D に相当する W_c/S (S は後述するブレードビットの刃先面積、この値はビット圧をあらわす) との関係を、千葉県下の砂泥岩を中心に室内実験で求めたものでは 図-8 のようになり、良好な相関を示す。

トルクとビット荷重の関係には、掘進速度における W_c/D に相当する屈曲点は認められず

$$T = CW, \quad C \text{ は定数, } T \text{ はトルク}$$

の関係が見出される。 C は岩質・強度など岩の性質によって異なり、図-7 の曲線 ①, ② を直線で近似すれば、それぞれの領域で R/N と T はほぼ直線関係を示す。そして W 一定の場合、岩が軟らかければ T が大きくなり、 R/N が一定なら岩が硬いほど T は大きい。しかしながらトルクは掘進速度に比べ、機械まさつやスライム

^{*} これは多孔質で brittle な岩石の Griffith crack による破壊理論により説明され、軟質泥岩にも拡張される。Robinson (1958), Murrell (1962)。

図-9 エレクトロドリルによる掘進速度 (R) とビット荷重 (W) の関係の一例

の量や質・孔壁まさつなど孔底の岩質以外の要素に影響されやすく、一般にばらつきが大きい。それ故掘進記録による地質情報は、掘進速度 (掘進率) による方が望ましい。

さらに以上の関係は、岩質が同じでもビットの種類、形状によって大きく異なる。簡易海底ボーリング装置による実験例を 図-9 に示す。⁴⁾ この実験に用いた岩は群馬県下の中新世富岡層の砂岩 ($qu=220 \text{ kg/cm}^2$) である。一般に軟質岩ではブレードビットが、硬質岩ではコーンビットの効率が良い。

3.2 掘進情報に関する現場実験

野外陸上部と海底での現場実験を試みた。

前者は千葉県君津市の砂泥軟岩で、通常のボーリング機器を使って実施したものである。⁵⁾ 海底実験は沖縄県本部の未固結サンゴ砂について簡易海底ボーリング装置を用いておこなわれた。

陸上部の試験では、深度 50 m、孔径 86 mm の孔を直線上で 1.5 m ずつはなして 3 本削孔した。地質測定用調査ボーリングでは掘進能率は二の次にして掘進条件を一定にし、掘進条件の測定精度もあげること、ビットも掘れすぎず適度に掘れるものが良く、形が簡単でビット圧の算出や破壊機構が考え易いことなどが必要である。このため一般のボーリング機器に多少の改良を加え、回転数を 30 rpm まで落せるようにし、給圧の測定精度をあげ、連続測定ができるよう、計器をメーター指示から半導体素子を用いた自動記録式にした。またビットに関しては

写真-8 掘進率検層用の3枚羽ブレードビット (86 mmφ, 中央未使用, 左右は2, 3号孔 50m 掘進後)

軟質地盤計測に適するよう、にげ角 0, すくい角 0 の、むしろ掘れにくいブレードビットを試作使用した (写真-8)。

1号孔はメタルクラウン、ダブルコアチューブによるサンプリング孔とし、同時にビット荷重 200 kg, 回転数 30 rpm の一定条件で掘進することにより、コア採取す

るかたわら掘進速度の測定をおこなった。そして採取コアについては地質観察と室内試験を実施した。2号孔は掘進記録のための試験孔とし、上述のブレードビットによる掘削により、 $R/N-W/S$ 曲線を求めるため、10 cm 毎にビット荷重を変えるなど掘進条件をいろいろ変えて実験した。なお地質条件は1号孔のコアと物理検層から判断した。3号孔は、一定掘進条件 (ビット荷重一定) で掘進記録をとるのに用いた。またそれぞれの孔で、削孔終了後各種物理検層を実施した。

試験地点の地質は、新第三紀上総層群の黄和田互層と呼ばれる砂泥軟岩である。泥岩は一般に均質で所々に貝殻が散在し、粘土質岩で $q_u \approx 100 \text{ kg/cm}^2$, シルト質岩になるにつれ 50 kg/cm^2 程度になり、全体としてこの間にばらつく。砂岩は pumice・scoria・貝片が散在する細～粗粒砂で粘着力が小さい。砂分が多いもので $q_u \approx \text{数 kg/cm}^2$, pumice が多く粘着性が大きいもので $10 \sim 15 \text{ kg/cm}^2$ 程度である。

2号孔の試験により図-10 が得られた。これから W_0/S を求め、図-8 と同様な関係を求めると、測定数が少なく、数 m 分の掘進記録に対し、コアの圧縮強度は数

図-10 現場実験で得られた給圧～掘進速度曲線と W_c/S (砂泥軟岩)

図-11 ビット圧一定で掘進した砂泥軟岩の一軸圧縮強度と掘進速度の関係（現場試験）

個の試料で代表させていることによると思われるばらつきはあるものの、かなり良い相関が認められる。図-10 からわかるように岩の硬さに大きなばらつきがある地盤では、この W/S による方法か、 R/N を一定にする掘進方法が必要であり、これらはそれぞれ測定手順が複雑であったり、掘進の操作がむずかしい。そこでこの実験のように硬さのばらつきがせいぜい 10^1 程度の場合にはビット荷重を一定にしたときの R/N に頼るのが、測定もしやすく賢明である。図-11 は以上の立場からおこなった3号孔の資料を中心に得られた q_u と R/N の関係であり、良好な相関が見出せる。

さらに地盤の岩種が砂岩泥岩の互層などのように比較的単純な場合には、図-11 からわかるように、一軸圧縮強度は岩相に関係するから、掘進速度から岩相の判断が可能である。ここでおこなった実験でも、コア観察と物理検層結果などと比較するとマイクロログ* よりも良い精度で岩相の違いを表示し得ることが判明した。

海底実験は、上述の水深約 40 m の地点でおこなわれた。掘進速度の測定は、図-1 の水圧シリンダの動きを船上の空気・水タンクの水位計から一定時間（10 秒）毎に読取り、トルクの測定は、これが電流に比例する**ことを利用して、電流計を一定時間毎に読取っておこなった。なお時間計測にはストップウォッチを用いた。実験に用いたビットは、95 mmφ の軟質用トリコーン (3S)

* 電極間隔 2.5, 5 cm の電気検層

** $P=1.03 \times 10^{-8} TN$, P : 回転エネルギー (kw), T : トルク (kg-m), N : 回転数 (rpm)

図-12 簡易海底ボーリング装置による掘進率検層（サンゴ砂、水深 40 m） $\bar{R}$: 平均掘進速度、 σ : 標準偏差、3S: 軟質トリコーンビット、B: ブレードビット（ ）内数字はビット荷重 (kg)

ビットと三枚刃ブレードビットである。

実験結果を図-12 に示す。これは深度に対して掘進速度 R 、電流 Amp をプロットしたもので、海中でモータを回転せずにドリル本体を落下させたときの速度（ビット荷重 180 kg に相当）も同時に記してある。これからおそらくは水圧シリンダのピストンの摩擦などによると思われる速度のばらつきが認められる。ほぼ同じ地点で掘ったコーンビットとブレードビットを比較すると、ビット荷重一定 (180 kg) の場合、コーンビットでは上述の機械的なばらつきを越える掘進速度の変化が認められ、なんらかの地質の違いをあらわにしていると考えられる。ブレードビットの場合は掘進速度が大きすぎ、海中での落下速度に近く、ばらつきも同程度であり、地質情報は得られない。そこでビット荷重を 102 kg に下げ、上記のコーンビットとほぼ同じ掘進速度で測定をおこなった。これは図-12 に示すように海中落下速度のばらつきを超える速度変化は認められなかった。試験地盤のサンゴ砂は地質にかなりのばらつきがあるため、これら掘進速度曲線の違いが直ちにビットの種類の違いとはいえないが、このような未固結砂では少なくともコーンビットの方が掘れにくく、1 m 区間の地質情報も反映しうることが認められた。そこで同時に測定したトルクをあらわす電流の深度分布に着目すると、ブレードビットでは有意の変化は認められないため図示しなかったが、

コーンビットの場合は掘進速度との間に、相関係数 -0.84 の良好な相関が認められる。推進速度とトルクの関係は前述したように、固結地盤では正の相関があり、これは前記の軟岩のブレードビットの実験から、ビット 1 回転当りの掘削量が大きいほどトルクが大きいことを意味すると考えられる。しかるに今回の実験では掘進速度の速いところでトルクが小さくなる。この原因としては、ほんの臆測にすぎないが、この地点の地盤はサンゴ塊混りの細砂～微細砂であるから、例えばサンゴ塊掘進時の振動などにより、未固結のマトリックスが液状に近い状態となり、このような部分を掘進するとき、掘進速度は大きくトルクが小さい現象が起り得る。しかしこれらの実験は、サンゴ砂という特殊地盤で、しかも海底下 1m という限られた条件のものであるから、もっと長い区間全体について考えてみると、むしろコーンビットは液状化を促進し、地盤の締り具合を忠実にあらわさないものかも知れず、逆にブレードビットは、ばらつきも小さく、1m という区間の地層の平均的性質を適格に表示し、メートルオーダーの地層の締り具合を知るには適切なものかも知れない。しかしこれら未固結層についてはあまりにも実験資料が少なく、ビットの種類・形状、ビット荷重、回転数、送水条件などに関する陸上部での詳細な試験に待つところが多いが、底置きボーリングによる、一種の力学検層（これを掘進率検層と呼ぶことにする）の見透しは十分に得られたように思う。

3.3 掘進記録の測定と解析

1) 測定方法：現場における測定法としては、

- (1) 10 cm 毎にビット荷重を変化させ、4～5 点の測定で 1 つの $R/N \sim W/S$ (または W/D) 曲線を作りながら掘進し、50 cm～100 cm 毎の W_e/S を求め一軸圧縮強度 q_u を推定する。
- (2) W を一定にして掘進し、 R/N を連続的に求め、 $R/N \sim q_u$ の相関々係から q_u を推定する。

のどちらかが実用的であることが 3.2 で認められた。前者の場合、測定のための掘進パターンが複雑であり海底ボーリングでは欠点となるが、地盤の種類（硬軟）にかかわらず広範囲の強度特性を表現でき、その精度も良い。従って海底ボーリングの場合には、簡便な一種のサウンディングである掘進率検層専用機としての発展性の方が期待できる方法である。後者の場合には、地盤の強度範囲が狭く、あまり硬くない岩により適しているが、掘進操作が単純である。3.3 の実験によりコア採取時の記録からも解析が可能であることも認められた。従ってこの方法は大型装置に附随させて、コア採取時またはコアボーリング地点を補間するサウンディングとして利用

するなどの方法が考えられる。

いずれにしても、3.1 で論じたように、強度との相関を良くするために、できるだけ清水掘とし、図-7 の ③ の領域に入らない掘進が不可欠である。またスライムを良く排除することも欠かせない条件で、十分な送水が必要である。

2) 解析システム；地質の解析に当っては、上記 (1) の場合には例えば図-11 に、(2) の場合には図-8 に見られるような関係式によって、強度の代表値として一軸圧縮強度 q_u が求められる。そして図-13 に示す手順で、粘着力 C 、弾性係数 E などの力学量が推定される。但し図中の $E \sim q_u$ の式は、東京湾周辺地域の土～軟岩（コア）に関するものである。そこで地盤の変形係数については、図-14 に示すように、コア値と比較してみると両対数グラフで考えた場合、少なくともコアの弾性係数が 10^3 kg/cm^2 以下のものでは $E \approx E_p$ (孔内変形性試験値)

図-13

図-14 タイ積物の変形係数の固結に伴う変化，コア試験値 (E_s, E_{os}) と現場試験値 (E_p, E_o, E_i) の比較
(※孔内変形性試験は吉中 (1968) に加筆)

とみなして良い。吉中¹²⁾によれば，土～軟岩領域では径 30 cm の剛体円板による平板载荷による変形係数 E_{30} とは， $E_{30} \approx 3E_p$ の関係が報告されており，以上の関係から地盤としての変形係数を推定できる。しかし硬岩領域では，図に示すようにこの関係が成立しなくなり，従って岩片の強度と地盤の掘削性などに関する一種の Index としての利用法が期待される。

以上の説明は，ある程度固結した地盤に対しての実験から得られたものであり，未固結地盤については，一部の見透しが得られたに過ぎない段階であるが，さらに N 値，コーン貫入抵抗などのサウンディング値も含めた地盤の諸性質との比較実験が望まれる。

また掘進速度からは 3.2 で述べたように，岩種が単純な場合には，強度と岩相の相関からかなり細かい岩相の判断ができる。

3.4 掘進率検層の実用性

底置式海底ボーリングの開発と並行して，海中サウンディング機器の発展もめざましく，なかでも底置式コーンペネトロメータにその成果が認められる。例えば，Shell Research, N.V. の機器⁹⁾では，可深度の増加，ロッド周辺の摩擦，コーン貫入の反力などに独特の方式を用いて難点を解決している点は注目値する。この種機器の発展により，海底下数 10 m の未固結地盤のサウ

ンディングはかなり解決された感がある。そして前述の掘進率検層による未固結層での実験から考えても，この種地盤では従来のサウンディングの方が精度が良いものと思われる。しかし最近のように海洋構造物が多機化，大型化するにつれ，基礎地盤としての性質もかなり締った地盤や岩盤にまでかなりの精度が要求されるようになり，埋設アンカーや岩掘削のための岩の性質，岩着や岩着面の風化状態などの情報も含めて，従来のサウンディングの範囲を越える領域がとみに増大している。そしてこのような領域においても，とくにコア採取がむずかしい岩の悪いところにおいて，短期間に，広くしかも比較的安価に工学的性質とその分布を確認できるサウンディングがあれば便利であり，この辺に掘進率検層の価値が見出せるように思う。さらに不攪乱コアを採りながら同様な情報が同時に得られる点では，3.3 で述べた (2) の方法は使い方によっては便利な方法であろう。

以上のような事情から考えれば，まだほんの見透しが得られたに過ぎない，掘進率検層による未固結層のサウンディングは，せいぜい大まかな違いが判定できれば，一応の目的は達成されるものと思われる。

もちろん掘進率検層に関しては，海水掘りでのスライムの除去，とくに礫や割目の多い岩の掘削での問題，地質情報を得やすいビットや最適掘進条件の追求など実用化にともなう残された問題も多く，現場資料の集積と方法の標準化が望まれる。

ま と め

1. 試作した簡易海底ボーリング装置 (エレクトロドリル) を用いて，底置式海底ボーリングにより地質情報を得るための機器の開発と諸試験を試みた。
2. 1 回の海中降下・掘進の作業によって，コアによる地質情報を効率よく得る方法として，ゴムスリーブサンプラーを開発し，これによって得られる二重スリーブコアの試験システムを作成し，それに基づく試験をおこなって実用性を確めた。
3. 底置式海底ボーリングで得られるもう 1 つの地質情報として，掘進記録に着目し，土～軟岩領域の現場実験によって，掘進速度による一種の力学検層 (掘進率検層) の可能性を追求した。そして掘進速度から圧縮強度やせん断定数を，さらに圧縮強度との相関々係から変形係数を推定できることが見出された。
4. 掘進率検層は岩盤の“サウンディング”機器としての独自の発展性が期待されるが，一方ではサウンディング値としての精度はぎせいにしても，コア採取と併用して，同時に一種の孔内試験値が得られる，コアビ

ットで、一定荷重 W で掘進する方法も地質情報を得るための重要な手段である。

参 考 文 献

- 1) Atlas Copco (1973): Maricor—Diamond Core Drill for Seabed Sampling, MCT Printed Matter No. 15358
- 2) Bingham, M. G. (1965): Oil and Gas Jour, Technical Manual
- 3) Delacour, J. (1965): French Flexible Drillstem Tools and Technique Look good, World Oil Jul. 1965
- 4) 藤井清光他 (1973): 小型エレクトロドリルによる掘削性能, 石油技誌 Vol. 38, No. 6, p. 327~334
- 5) 小島圭二 (1972): ボーリングの掘進性能による軟岩地盤強度の推定, 土木技資 Vol. 14, No. 12, p. 9~16
- 6) 小島圭二他 (1973): 軟岩・弱層不攪乱コアの採取と試験方法, 第4回岩力国内シンポ p. 1~6
- 7) 松本一明 (1971): 大水深におけるボーリングおよびサンプリングの現状, 港湾技研資料, No. 129
- 8) Murrell (1962): (Fuirhurst's) Rock Mechanics, p. 563~577
- 9) Oil and Gas Jour. (1972): Submersible Sounding Tool to Test North Sea Floor, Jan. 10
- 10) Robinson (1958): AIME, Petroleum Transactions Reprint Series, No. 6
- 11) 田中彰一他 (1973): 簡易海底ボーリングによる地盤調査の新しい試み, 施工技術 Vol. 6, No. 5, p. 73~80
- 12) 吉中龍之進 (1968): 横方向地盤反力係数, 土木技資 Vol. 10, No. 1, p. 32~37

(昭和49年9月25日受理)