



ボーリング削孔の現場

高 川 真 一

トンネルや橋梁、道路、鉄路、ビルディング、家屋、といった建造物を設けるにあたっては、その地盤がこれらを支えるに足る十分な強度を持っていることが必要であり、もし不足しているのであれば補強が必要である。地盤の強度は地下の地層構造に関係するため、表面からの目視では全く分からない。これを把握するには現在では電磁波や振動などを利用したいろいろな調査方法があるが、分解能の点で孔を掘ることに勝るものはない。また掘削孔は杭を挿入することで当該地盤の強化にも役立てることができる。

キーワード：地盤強化、地質調査、高温削孔、海洋掘削、ロボット化

1. いろいろなボーリング削孔

ボーリング削孔という作業はあまり目立たないが、建造物建設の初期段階で必ず実施される。この段階で当該地盤がそのままで、あるいは補強済みで丈夫であることを確認された後に、建造物の建設が始まる。私たちの目に入るのはこの建設が始まってからであり、それ以前の作業についてはほとんど目に入ることがない。地味な作業であるが、きわめて重要な作業でもある。

(1) 地盤強化

ビル建設のための地盤強化という目的のボーリング削孔であれば、地下にある強固な岩盤まで杭を打ち込み、この杭を脚としてその上に建造物を構築する。これによって丈夫な建造物が誕生する。2015年に発覚したマンションの傾斜問題は手抜きで杭が岩盤まで届いていないまま建設された結果である。

近年は局所的な豪雨が頻発しており、そのたびに斜面崩落とふもとの住宅の破壊というニュースが流れる。斜面の樹木の根が地下深くまで伸びていれば崩落に対して強固な対抗力を発揮するが、杉などの植林による樹木は深さ2m程度と根が浅いため、表層の土砂が崩落しやすいという問題を有している。そこで植林樹木に替わって6m程度地下深くまで杭を打って地盤を強化し、崩落防止を図る方策が取られる（写真—1）。

ビル等の地盤強化や、斜面あるいは鉄路や道路の盛土の強化はこのような杭打ち方式が多い。杭打ちの場合、最初から杭を叩き込む方法もあるが、削孔した孔

の中にセメントを流し込んで固めることもある。この場合、芯材として鋼棒（ロックボルト）や鉄線あるいは合成繊維索が用いられることが多い（写真—2）。



写真—1 法面補強での削孔と補強のためのロックボルト打ち込み



写真—2 東京都渋谷区：アンカー工事

このようなボーリング削孔では地層はほとんどの場合、土である。

(2) 水井戸

日本ではあまり目立たないが、発展途上国において重要なのは水の確保である。ニュース映像では遠く離れた川から毎日何回も子供たちが水を汲んで運んでくる様子が紹介されるが、人間が生活するためには水の確保が不可欠であり、地下水源から水を組み上げる水井戸の開発が発展途上国各国で日本などの協力で行われている。地下水源を探り当ててボーリング削孔し、出てくる水がちゃんと使えるように整備するとともに現地の人たちでその後も管理・運営できるようにしている（写真—3）。



写真—3 ブルキナファソ：水井戸掘さく工事

(3) 試験削孔と掘削障害

入り口からの距離が長く、かつ地表からの深さも深いところを通るトンネル工事の場合など、工事の前に通過予定の場所の地質状態を把握しておくことは極めて重要である。特に日本のように断層が多い国では、その断層帯が地下水の流路になっていることが多く、うかつに孔を開けると大量の出水となり、工事が中断されてしまう。またこのような破碎帯は砕けた岩体が詰まった状態であり、先端に刃がついたビットを押し付けて回しても岩体が動くだけで掘り進めないことも多い。

さらに、長いボーリング削孔では緩い土、締まった土、岩体、非常に硬い岩体、礫など、削孔の進行によって地層状況がいろいろ変化し、かつ地層の圧力もかか

るので、削孔した孔がつぶれることもある。

トンネルの本坑の工事でこのようなことが起こると大変であるので、事前に小さな孔を掘って地層状況を確認する。地質についてはある程度予測はできるが、実際に掘ってみると予測とは大きくずれることもよくある。試掘の使命は本坑削孔に先立ってルート上にどのような地質があるかを確認することであるので、このデータはそのまま本坑削孔に活用される。

削孔中には様々な障害が生ずる。一つの例が前述の出水である。また地中には可燃性流体が閉じ込められていることがあり、うかつにこれを掘りぬくと爆発・火災を引き起こすことがある。これが資源として活用できるほど大規模であればそのように対応するが、小さくても削孔作業現場を無力化する程度の破壊力を有するものは決して少なくない。存在が予想される場合は防噴装置を装備した削孔となる。また、可燃性ではなくても硫化水素等の毒性流体もあり得る。

地層圧力が局部的に高い場所では、せっかく掘った孔がつぶれることがある。このため、掘った孔が崩れないように外径がほとんど穴径に近い太さの鋼製のパイプ（これをケーシングパイプと呼ぶ）を挿入する。前述の破碎帯削孔ではビットの進行に合わせてケーシングパイプを押し込んで岩体が邪魔をしないようにしつつ掘進する。

ビットで掘り進むと、そこには掘削孔という空洞が生じ、土砂・岩石との間に境界が新たに生ずる。この面は新鮮であり、刺激に弱いために、崩れやすい。ケーシングパイプが来るまで堪えてくれればよいが、この新鮮な壁を補強することとビットの冷却・潤滑も兼ねて、粘土分であるベントナイトを混ぜた掘削流体が送り込まれる。この流体は一般には「泥水」と書いて「でいすい」と呼ぶ。これが送り込まれることでベントナイトが新鮮な壁に付着して補強することにより、崩れにくくなる。掘削流体に添加されるのはベントナイトだけでなく、削り屑の送り出しを容易にする増粘剤や孔の中の圧力調整に利用できる増重剤としての硫酸バリウムを主成分とするバライトなどが用いられる。

削孔すれば必然的に排土が出てくる。この排土はそのまま処分できるわけではない。まずは検査機関で成分分析され、有毒成分が無ければ決められた区画内での投棄処分となり、ヒ素やカドミウム等の毒性重金属類が検出されれば無毒化処理が求められる。

2. 削孔の手法

削孔は、先端に刃がついたビットをドリルパイプの

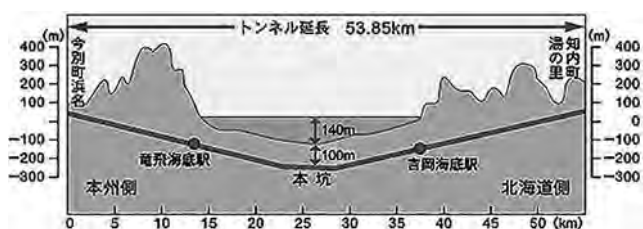
先端に装着し、このビットを回転させつつ地層に押し当てて力を加えて掘り進むのが普通である。ビットの刃の特性を変えることで、土だけでなく非常に硬い岩石でも削孔できる能力を付与できる。現在ではより速い掘進速度を目指して、回転だけでなく打撃も加える手法が取り入れられている。

また孔を掘るだけでなく、地層を円柱状にして取り出して（これをコアと呼ぶ）地層構造や構成成分の詳細分析が行われることもある。

(1) 削孔の方向

削孔というと上から下に向かって掘り進むというイメージを抱きやすいが、実際には横もあれば逆に下から上ということもある。トンネル工事では横方向のイメージがあるが、ルートに沿って上からルートの高さの位置まで掘ることもよくある。青函トンネルの工事ではルートに沿って津軽海峡の海面から船で掘削装置を海底に降ろしてそこから所定の深さまで削孔して試料を得ている（図—1、写真—4）。

下から上というのはあまりないが、鉱山などで中にトンネルができていて、そのトンネルの天井から上に向かって大きな孔を開ける工法が用いられることがある。直径6mもの巨大な縦穴で、山の上からこの穴の中に採掘した鉱石を落とし込むと、その下で待つて



図—1 青函トンネル

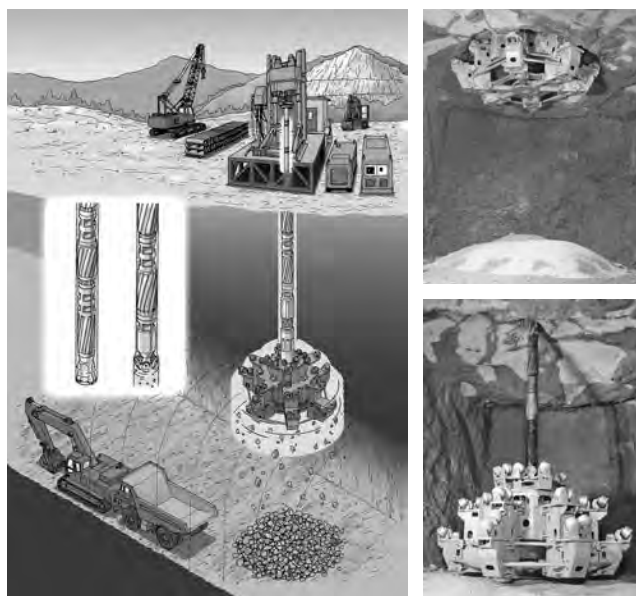


写真—4 第3海工丸に搭載されたMD-500S（津軽海峡）

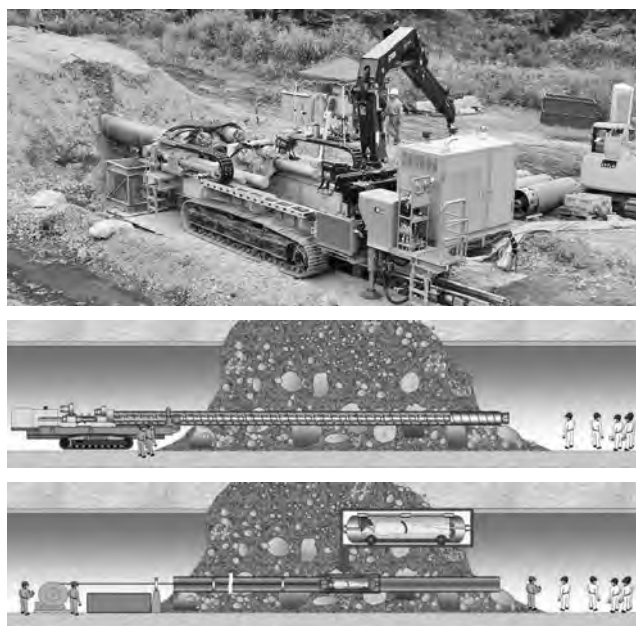
いるダンプに鉱石が搭載され、鉱山から運び出すという方式である（図—2）。

そのほかにも有名どころでは、人命救助で有名になった2010年のチリのコピアポ鉱山落盤事故ではフェニックス計画という救出計画により、33名の閉じ込められた作業員全員が急遽削孔された縦穴を通して救出された。

同様の落盤事故は世界中で多発しているようで、水平削孔式で閉じ込められた空間との間に人間が通れるくらいの抜け穴を確保する救助装置も開発されている（図—3）。



図—2 大口径岩盤掘削（立坑）BM600 φ6000mmリーミングビット



図—3 人命救助用掘さく機FS-120CZ

(2) ビット

孔底で地層を削孔して掘り進んでいるのが刃先であるビットであるが、これにはいろいろな種類がある。代表的なものはローラーコーンビットと呼ばれるもので、回転するイガグリ頭が先端に取り付けられており、それぞれのイガが孔底を叩き、削っていくものである。また回転部分を持たないフィックスカッタービットとして超硬合金やダイヤモンドの粒を埋め込んだものや、ダイヤモンドの粉を練り込んだ焼結材で自己摩耗しながら削孔していく方式などがある。

これらのビットはドリルパイプの先端に取り付けられ、駆動力は一般にはドリルパイプを地表で回転することでこの回転力がドリルパイプをそのまま伝わってビットが回る方式が用いられる。

一方で掘進速度をできるだけ早くしたいという要望があり、回転数を早くしたりビットの押付力を大きくしたりという方式では限界が来ていることから、軸方向の振動を加える方法が用いられるようになってきている。数 Hz ～数十 Hz の振動が用いられており、低周波数では大きなビット荷重が、高周波数では小さめのビット荷重が選ばれる。低周波での大きなビット荷重では一撃で岩石が広い範囲にわたって碎けるために孔の形状は乱れたものになりがちである。このため高周波で小さめのビット荷重を用いることにより孔形状をきれいに保つ方向にある。

現状でのこの振動方式は、振動駆動装置が大型であるために振動力を地上に出ているドリルパイプの後端に伝えており、ドリルパイプ自体の弾性によるばね効果で削孔長が長い場合は振動力が十分伝わらないという問題を抱えている。

この問題を解決する手法として、孔径と同程度以下のサイズで孔底付近にビットと共に装備できる振動駆動装置の開発も試みられている。

(3) 耐熱性能

一般論として地下深く行くにしたがって温度は高くなる。これを地温勾配というが、普通は深度 100 m につき 3℃ 程度上昇と言われる。したがって 1000 m 掘って水脈に当れば 30℃、1500 m 掘れば 45℃ 高い温泉水が得られることになる。もちろん場所と深さによってこの温度は異なるが、東京・大手町にも温泉施設が設けられ、同様に西武秩父駅前でも設けられるようになってきている（写真—5、6）。

この程度の温度であれば機械に悪影響を与えるものではないが、このまま 10000 m 削孔というとそれだけで 300℃ を超すことになる。前述のように削孔は機



写真—5 東京都 温泉掘削 SSD-3000



写真—6 埼玉県 温泉掘削 SSD-3000

械類だけでなく、セメントやベントナイト、増粘剤、増重剤等が組み合わさって活用されることで機能するので、この 300℃ というのは現状で削孔可能な最高温と位置づけられ、実態上はもう少し低い 250℃ 程度が現実的と言える。

一方で、火山国日本では火山研究のための火道（地中で溶岩が流れた道）調査や、再生可能エネルギー開発の一環としての地熱発電用の高温岩体削孔の開発計画があり、水の超臨界温度（= 376℃ 以上）を目指した削孔についても検討されている。

岩手県葛根田では 1995 年に地下 3729 m で 512℃ の高温岩体を水で冷却しながらも削孔しており、アイスランドでは 2017 年に地下 4659 m で 427℃ の高温岩体削孔を達成している。このような状況で、水の超臨界温度以上でも支障なく作動するビットやモーター類といった機械部分についてはいろいろ検討が進んでいるが、併せて機能すべき掘削流体等についても今後検討が必要である。これらを踏まえて、高温岩体での地熱発電システムについて検討が進められている。

3. 海洋削孔

今まで主として陸上における削孔について述べてきたが、海での削孔も重要である。特に海の場合は、陸上と違って風化があまり進行していないことから、過去の地球を再現する科学研究にとって貴重なデータを提供するほか、巨大地震発生メカニズムの解明や、モホ貫通（＝モホロビッチ不連続面貫通）＝マントル到達という 1960 年代からの地球科学者の夢にあふれている。

またマントル削孔では温度が高くなると予想されるが、現状では前述のように 300℃ が限度とみられることから、これよりも温度が低いと予想される削孔候補

地点を国際的に探しており、ハワイ沖とメキシコ沖、それにコスタリカ沖が候補に挙がっているようであり、温度も 200℃ 超を見込んでいるようである。ただ、マントル境界の温度は一般にはもっと高いようであり、高温でも削孔できる前述の耐熱性能の向上が求められている。

これらの自然科学面のみならず、近年注目されている海底鉱物資源の活用も魅力あふれる題材である。海底石油は残念ながら日本近海にはほとんどないようであるが、海底のメタンハイドレートや熱水鉱床、コバルトリッチクラスト、マンガン団塊、レアアース泥等々、日本の排他的経済水域内並びに周辺に多量に存在することが見いだされてきている。

陸上であれば、とにかく現場に歩いて行って状況を目視し、必要があればハンマーで岩体の表面試料を採取することも可能である。しかし海では現場である海底に行くこと、見ること、触ることは非常に困難が伴う。そこで代役として音波探査や近接写真撮影手法等、ロボット技術を駆使した方法が開発され、これらを用いて詳細な調査が行われている。

それでもやはり、詳細調査には削孔で試料を直接採取してくるのが最善である。

(1) メタンハイドレート

メタンハイドレートの試掘では短時間の採掘には成功しているものの、メタンガスの抽出に伴うハイドレートの網目構造の崩壊と砂の遊離によってパイプが詰まる問題が近いうちに解決できると期待される。

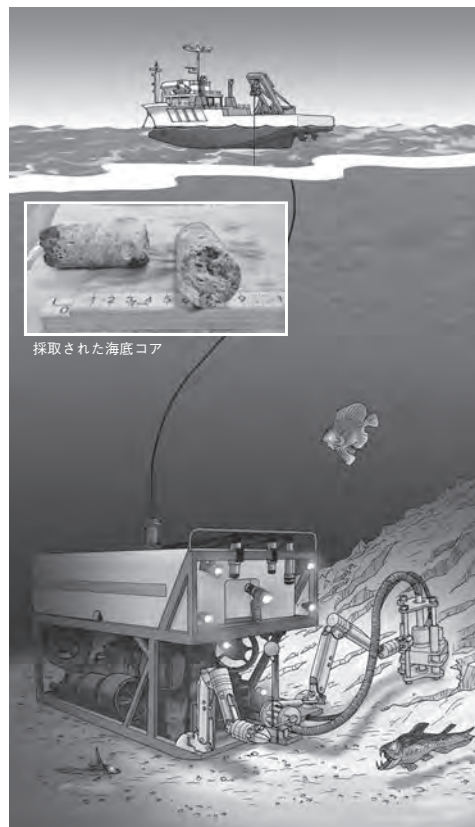
(2) 熱水鉱床

熱水鉱床採掘では熱水活動が終了した鉱床の立体構造が削孔によって見えてきたことから、露天掘りと同じ方法による採掘と細粒化、そしてライザーによる揚鉱試験も行われ、スムーズに進行することも確認されている。

(3) コバルトリッチクラスト

コバルトリッチクラストは、厚さが数 cm ～ 30 cm 程度で膨大な広さにわたって海山の頂上や斜面に張り付いている表皮状の塊で、平均的には厚さは 10 cm 程度で、コバルト等有用鉱物が高濃度に含まれており、また白金もかなり含まれることがある。同じ海域であっても場所によって成分が異なるため、その海域での全体量を把握するには多数地点での試料採取が必要となる。とは言え、推定でその面積は約 5 万 km² とあまりにも広大なため、従来の掘削船による削孔でこ

の試料を採取することは現実的ではない。そこで魚のように自由に海中を航走できるロボットである ROV に小型の削孔装置を持たせ、1 回の潜航で 10 点ほどの試料を採取してくることを何日も繰り返すことによって、短期間で当該海域のコバルトリッチクラストの全体的特徴を把握できるのではないかと期待されている（図—4）。



図—4 マリンドリル ROV 機搭載イメージ

この装置のプロトタイプは、昨年実施した実海域試験でその性能が確認されている。

実際の商業採掘となるともはや削孔の世界ではなく、熱水鉱床採掘と同様に露天掘り＋細粒化＋揚鉱というプロセスになると考えられる。

(4) マンガン団塊

マンガン団塊は、世界中の海の水深 4000 ～ 6000 m の深海平原にマンガンの主成分とする握りこぶし大から大きなものでかぼちゃ大の塊が海底面を覆い尽くすように広がっている。主成分はマンガンであるが、ほかに鉄やアルミニウム、ニッケル、銅、コバルト等である。海底の堆積物に半分以上埋まっているので、これを海底面上で集めて粉碎・細粒化し、ライザーで揚鉱することになる。削孔作業が出てくる場はここにはない。

(5) レアアース泥

レアアース泥は2013年までに、南鳥島沖の太平洋の水深6000mの海底表面から海底下100m位までに磁石や電子部品に不可欠の希土類を高濃度に含む泥の状態が存在することが確認されたものであり、どのようにして採鉱するか、検討が進められている。ほかの熱水鉱床やコバルトリッチクラスト、マンガン団塊は成分にヒ素等の有毒物質を微量とは言え含んでいることがあるためにその処理には細心の注意が必要であるが、レアアース泥にはこのような有毒物質が含まれていないことから、有用鉱物を取り去った残滓についてはそのまま埋め立て等に活用できるという考えもある。

4. 削孔の新たな展開

削孔は文字通り孔を掘る作業であるが、今まで参加してこなかった新しい分野での削孔業務の展開も、今後は十分対応していく必要がある。

(1) 再生可能エネルギー関連

近年、地球温暖化問題に絡んで、再生可能エネルギーの活用についてかまびすしく語られるようになってきている。前述の地熱発電以外では、陸上においては太陽光発電や風力発電、小水力発電等であり、これらの基礎工事には多少なりとも削孔は貢献している。一方海においては、洋上風力発電や海流発電、潮流発電、波力発電について盛んに研究が進められている。

洋上風力発電については、水深が浅い場所では陸上の延長という形で脚をしっかりと海底に着座させた着床式風力発電装置が設けられる。ヨーロッパ・北海で見られる大規模の洋上風力発電はそのほとんどがこの着床式風力発電装置である。一方で日本は陸から少し離れるだけで水深が急に深くなるため、着床式風力発電装置が使えるのはごく限られた地域のみであり、大半は洋上に浮かぶ浮体式風力発電装置になる。

水面に浮いているものをそこから動かないようにするには係留をすることになるが、係留をするにはどこか地面の上に固定点があればならない。この固定点と水面に浮いているものとをロープでつないで固定＝係留することになる。

一般には浮体周辺に水深の3倍程度の半径で錨を海底に設置し、その錨から係留索は懸垂線を描いて浮体と繋がれる。風はあらゆる方向から吹いてくるので、錨は1か所ではなく周辺に何か所も設置し、それぞれ係留索が伸びる。このため、この係留索が張り渡され

ている領域は漁ができない領域になってしまう。このため、漁業関係者との協力関係が非常に重要になってくる。

一方で、この係留索による専有面積をできるだけ小さく抑える方策を開発することも必要である。専有面積を小さく抑えるということは係留索の傾斜が急峻になることを意味し、このためには錨には上下方向の引拔力に十分耐える能力が求められる。

船舶に装備されている普通の錨は、横方向の力が加わることで爪が海底に食い込んで横引きの力に対抗しており、真上で引っ張ると簡単に引き上げられる。このため上記の専有面積を小さくする目的にはこの船舶用の錨は不適合である。かといって上下引拔力に対抗できるようあまりに重くすると今度は扱いが容易でない。

いろいろな方式が提案されているが、削孔して海底にしっかりと根止めしたアンカーボルト等の頭に係留索をつなぐ方式もその一つである。課題は、大型専用船ではなく、漁港に泊まっているような作業船で施工可能な簡単で安価な方式を構築することである。

同じことは海流発電でも波力発電でも言えることであり、海で浮体を固定するために必要な錨をどのように設置するかは、きわめて重要な問題である。

浮体の下というのは実はいろいろな魚が集まる格好の場所である。こういう面でも漁業関係者との協力関係を維持していくことが必要である。

(2) 削孔の自動化・ロボット化

削孔機械は上述のようにいろいろの分野でいろいろの種類のものが用いられる。これらを運転するのは「熟練した技術者」であり、装置のそばにいて機械が発する振動や音、計器類の表示値の変化、場合によっては匂いなどから最適な削孔条件を見出し、その都度回転数や回転トルク、押付力を調整・制御していく。こういうことができるのが「熟練した技術者」である。しかしほかの業界と同じで削孔関係業界も若年技術者が減少しつつあり、一方で熟練技術者も高齢化して退職していくために減少しつつある。こうなると、装置があっても運転できない状態を招きかねない。

そこで熟練技術者が持っているノウハウをデジタル化し、削孔機械を自動化・ロボット化する方向で検討が進んでいる。そして、従来は技術者一人で装置1台の面倒を見ていたのを、技術者一人で数台の装置の面倒を見ることができるような方向を目指している。

5. おわりに

以上，とりとめのないことを綴ってきたが，削孔の現場は初期の基礎固めであるので，作業の最盛期としてマスコミで取り上げられる時点ではもう削孔作業はとっくに終わった後であり，目立たない縁の下の力持ち的な位置づけとなっている。しかし不可欠な重要な業務であり，しっかりした高度な作業がこなせる装置開発とその作業を確実に遂行していくこととしている。

JCM/A

【筆者紹介】

高川 真一（たかがわ しんいち）
鉦研工業㈱
技術顧問

