

気泡を利用したサンプリング技術および原位置試験 —主として砂礫地盤、軟質岩盤での適用例—

Undisturbed Sampling and In-Situ Test in Bore Hole
Utilizing Jet-Foam Boring Technique

唐 沢 優 (からさわ まさる)
中央開発(株)地盤技術部 専門課長

徳 丸 哲 義 (とくまる てつよし)
中央開発(株)地盤技術部 課長

塚 田 基 治 (つかだ もとはる)
(有)日本基礎技術 代表取締役

1. はじめに

近年、ダムや長大橋等の重要構造物の建設では、立地条件や社会的環境条件が厳しくなるとともに構造物自体も大型化、複雑化している。したがって、構造物の基礎として従来対象とされていた良好な地盤のみならず砂礫地盤や軟質岩盤などでも詳細な調査を要求されることが多くなっている。これらの地盤に対する地質調査、特にサンプリングに関しては一般的に用いられている泥水ボーリング工法（以下泥水工法という）を適用すると、砂礫地盤でよくみられるように、マトリックスが流失してしまうなどの問題が生じる。そこで、新しいサンプリング技術として各種サンプラーの開発や¹⁾ 地盤をあらかじめ凍結してサンプリングを行う地盤凍結工法の研究が進められているが、地盤に適した凍結技術の開発や不飽和地盤への適用性、経済性などが課題となっている。

著者らは、砂礫地盤や軟質岩盤等に対し泥水工法を適用する際の基本的問題点は掘削流体にあると考えている。そこで、新しい発想に基づく掘削流体として気泡を用いることを試み、各種地盤に対する適用性を検討してきた。これらの成果をもとに、本報文では、まず、気泡ボーリング工法（以下、気泡工法という）の現状と地質調査へ適用するまでの経緯を述べるとともに、我が国における主な気泡発生装置の特徴をまとめた。次に、新しく開発した気泡発生装置の原理、構造等を紹介し、本装置を用いて比較的難しいとされている砂礫地盤や軟質岩盤を対象に実施したサンプリング事例を報告する。さらに、

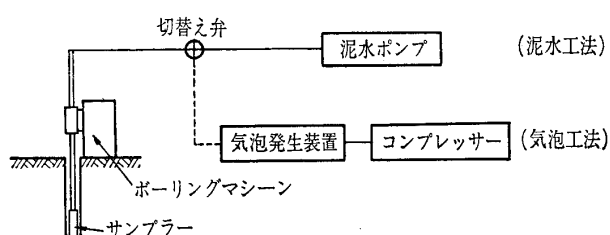
孔内を利用した原位置試験について気泡工法と泥水工法の比較実験結果をまとめた。

2. 気泡ボーリング工法

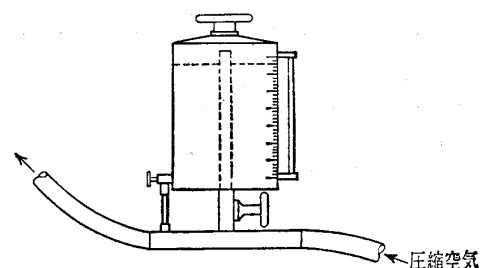
気泡ボーリング工法は、10数年前より徐々に使用されてきたが、近年、気泡性状等を含めた総合的な研究が進み実用化に至っている。本工法に使用される装置の一般図を図—1に示す。気泡工法では、泥水工法の泥水ポンプの代わりに、気泡発生装置、コンプレッサーを使用している。

砂礫地盤や軟質岩盤等のサンプリングに通常の泥水工法を適用する際の基本的問題点は、掘削流体として非圧縮性の泥水を用いることである。すなわち、サンプラーの先端から噴出する泥水は大流量（30～50 l/min）かつ、高水圧（2～5 kgf/cm²）であり、原地盤にかなりの衝撃を与えているとみられる。また、砂礫地盤のように不均質な地盤では、礫を切削している間に泥水が浸透し、マトリックスを流失させることになる。軟質岩盤や人工地盤においても掘削する地盤の周辺を脆弱化させてしまうことが多い。

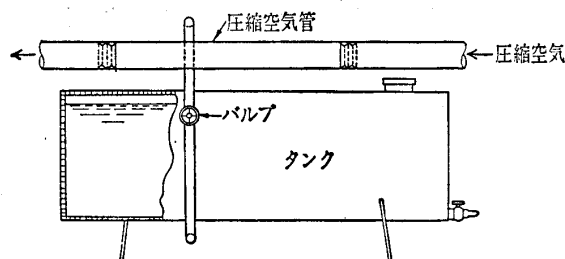
そこで、水に代わる掘削流体を用いたボーリング法として注目されるようになってきたのが気泡工法である。資源開発の分野で用いられているエア・ド



図—1 装置一般図



図—2 気泡発生装置（滴下方式）



図—3 気泡発生装置（差圧方式）

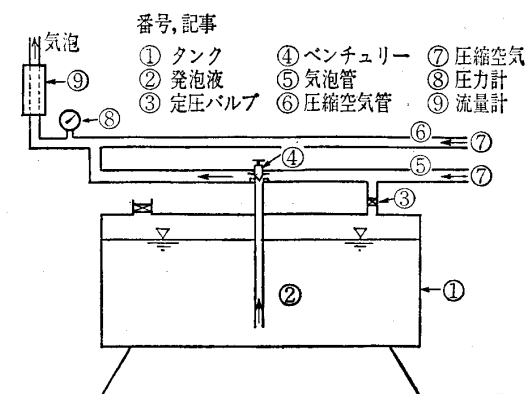
リングを基本にした気泡ボーリング工法は、圧縮空気の中に界面活性剤を注入発泡させ掘削流体とするもので、現在各機関で研究開発が進められている²⁾。界面活性剤を利用して発泡させる方法は、噴霧器の原理を応用したもので、我が国においては主に、滴下方式と差圧方式が知られている。これら2方式の気泡発生装置の基本的な構造を図—2、図—3に示す。

滴下方式は、気泡ボーリングが開発された初期のもので圧縮空気を供給するエア・ホースの中に界面活性溶液を滴下して発泡させ、これを圧縮空気とともにコア・チューブへ供給し、ボーリングを行う方法である。本方式は装置が簡便であるが、気泡性状に問題があるとされている。

差圧方式は、圧縮空気の圧力と密閉タンク内の圧力の差圧を利用しボーリング状況に応じて自動的に発泡させる方法である。この方法は滴下方式に比べて気泡性状は良好となるが装置が複雑となり、気泡の微調整および気泡と圧縮空気の混合に対するコントロールに熟練が必要であるとされている。

著者らの研究成果によると、気泡ボーリングの基本要件は、気泡の性状と安定性、制御のしやすさである。すなわち、次のような特性を有する装置によって良質なサンプルが得られると考えている。

- ① 微粒（コロイド状）で均質な気泡を効率よく供給できること。
- ② 対象地盤に応じて、サンプラーに供給する圧縮空気の圧力と流量、気泡の性状と発泡量を容



図—4 気泡発生装置（密閉タンク・定圧方式；J.F.B 工法）

易に制御できること。

- ③ 上記①、②を長時間安定して持続できること。

サンプリングに際しては、スライムの排除とビット冷却が効率よく行われねばならない。これを実現するためには微粒で均質な気泡が必須条件である。気泡が微粒均質になるほどスライムの付着面積が増加し、かつ、断熱膨張により冷却効果を高めることができる。一方、地盤は不均質であり良質なサンプルを得るためには、掘削土質に適した圧縮空気の圧力と流量、気泡の性状と発泡量にしなければならない。したがって、個々の制御が容易で安定した状態を長時間持続させる必要がある。

上記条件を満足する気泡発生装置として図—4に示す装置を開発した。本装置は差圧方式と異なりベンチュリー管を利用し高速気流と定圧タンクを採用しているところに大きな特徴を有している。すなわち、タンクは密閉型としタンク内の圧力を一定に保つことによって界面活性溶液を常に定量かつ、スムーズにベンチュリー部へ供給することが可能となる。また、圧縮空気をベンチュリー管へ通過させることにより高速気流を生じさせ、タンクより供給された界面活性溶液は、この部分でエアロゾル状となって気泡管から圧力ホースを介してサンプラーへ送流される。

3. サンプリング

気泡工法を利用したサンプリング実施例を以下に述べる。対象地盤は砂礫（不飽和，飽和），軟質砂岩，砂質土，改良土と多種多様にわたっている。

3.1 砂礫地盤

砂礫地盤は混入する礫種と礫径，マトリックスの

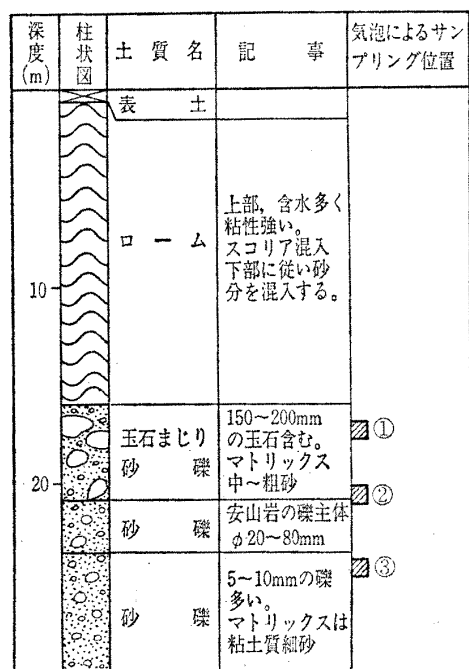
(1) 不飽和砂礫

礫分の多い地層でのサンプリングは、礫と礫が良くかみあわさっている場合、ボーリングマシンの給圧を一定にし、ロッドの回転数を 150~170 rpm に高め、ダイヤモンド(サーフェイスタイプ)を取り付けたサンプラーを用いることによって採取することが容易となる。礫が点在している場合には、礫を動かさないような工夫が必要で図—5 に示す可動ピストンを内蔵したサンプラーの使用が必要となる³⁾。

Diagram illustrating the components and dimensions of a hydraulic probe:

- ピストンロッド (Piston Rod)
- ピストン圧力調整装置 (Piston Pressure Adjustment Device)
- ダイヤモンドビット (Diamond Bit)
- 92 (Inner Diameter)
- 120 (Outer Diameter)
- 外管 (Outer Tube)
- 排水バルブ (Drain Valve)
- 内管 (Inner Tube)
- ビニールパック (Vinyl Pack)
- ビニールパック収納ケース (Vinyl Pack Storage Case)
- ピストン (Piston)
- 235 (Length of Inner Tube Section)
- 820 (Length of Outer Tube Section)

図-5 礫層サンプラー (PGS-92) 構造図



図一6 試験地点の柱状図

(2) 飽和砂礫

写真一 1 砂礫のサンプル (大阪層群)

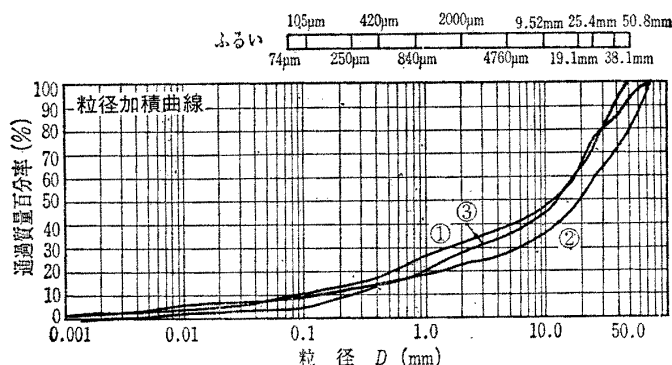


图-7 粒度分布

報告-2052

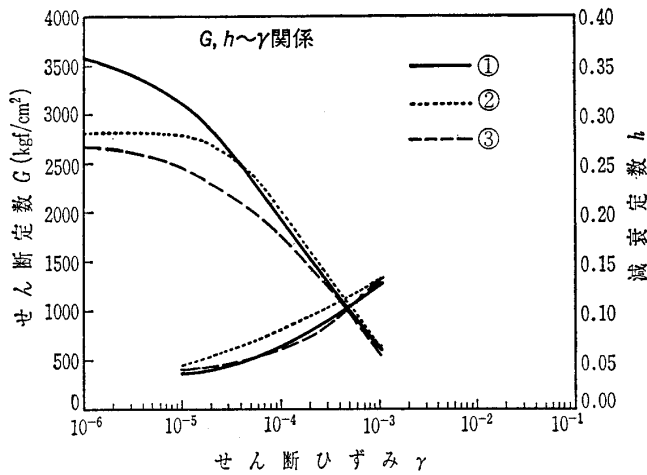


図-8 振動三軸試験結果例

に関しては、発泡効率を高めるために気泡発生装置のタンク圧をある圧力に保ち、圧縮空気の圧力および流量をできるだけ小さくし地下水位を可能な限り変動させないことも重要である。サンプラーについても、これまでの常識にこだわらず新しい発想による脱落防止機構の開発が必要となろう。

このような条件を考慮し、緩い地盤に対しては圧縮空気の流量 600~800 l/min, ボーリングマシンの給圧を 600~700 kgf/cm² に調整してサンプリングを行った。また、サンプリングには図-9 に示す構造を有する新開発のサンプラーを用いた。このサンプラーの特徴は、脱落防止に硬質ゴム管を利用したことで、サンプリング後硬質ゴム管の外側に地上から圧力水を送ってサンプル管の先端を閉塞し、サンプルを脱落させることなく地上に回収できる。

3.2 軟質砂岩

新第三紀の軟質砂岩は固結度も低く ($q_u=2\sim8$

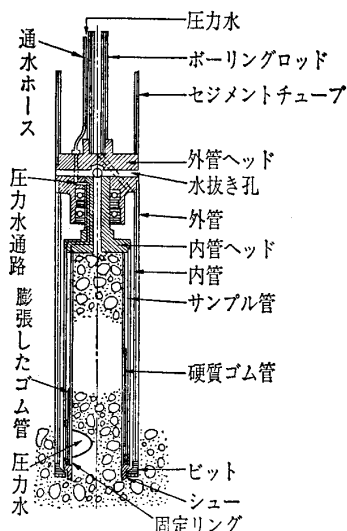


図-9 礫層サンプラー (RGS)

kgf/cm²), 泥水工法によるサンプリングでは、不攪乱試料の採取は相当に難しいのが実状である。不飽和層の場合、循環水を吸収して膨張しやすく、その結果、一部が洗い流されてしまうためと考えられる。したがって、これらの影響がほとんど生じない気泡工法を用いることにより不攪乱試料採取が容易になる。

図-10に示す地盤において、泥水工法と気泡工法でサンプリングを行い両者の結果を比較した。なお、気泡工法では圧縮空気流量を高めることによってスライムの排除に努めた。得られたサンプルを比べると、泥水工法では水分を吸収し一部軟質化しているのに対し、気泡工法のサンプルは原地盤の状態を保っている。図-11はボーリングマシンの給圧と掘進速度の関係を示している。泥水工法では、給圧を 200~500 kgf に増加させても掘進速度に大きな変化はみられない。一方、気泡工法では、スライムの排

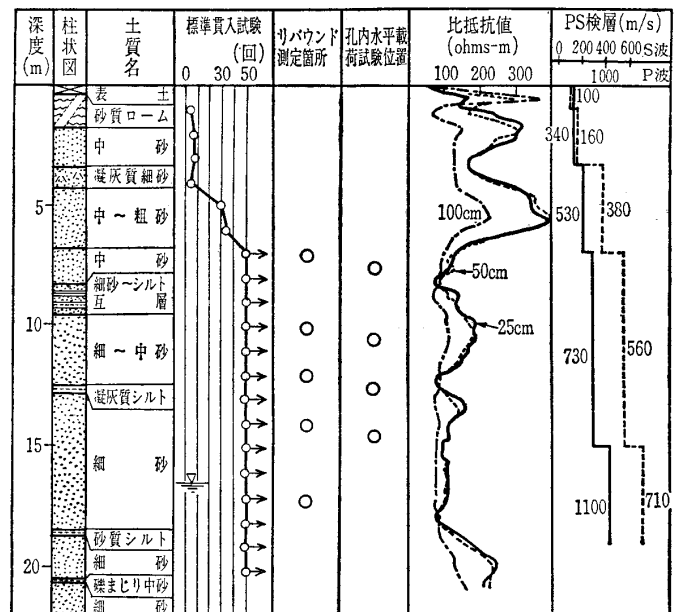


図-10 比較実験の対象地盤

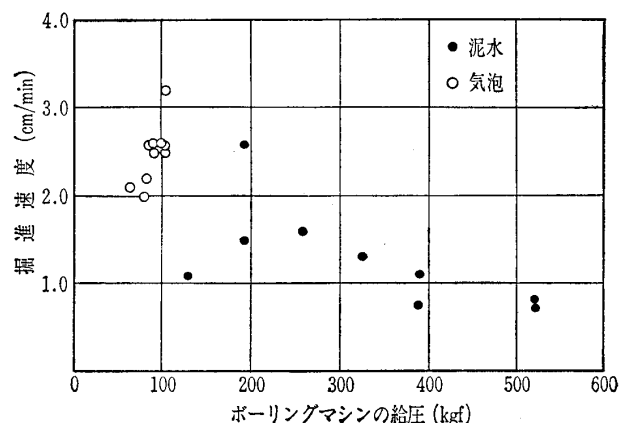


図-11 ボーリングマシンの給圧と掘進速度の相関図

表-1 対象地盤と掘削条件

対象地盤	使用サンプラー	ボーリングマシン給圧 (kgf)	回転数 (rpm)	気泡条件		
				ビット圧力 (kgf/cm ²)	圧縮空気流量 (l/min)	界面活性溶液 (l/h)
砂礫(不飽和)	コア・パックチューブサンプラー 礫層サンプラー (PGS)	100	80~150	1.5~2.5	1100	10
砂礫(飽和)	改良型コア・パックチューブサンプ ラー, 礫層サンプラー (RGS)	500~1000	45	1.3~1.8	600~800	10~12
軟質砂岩	三重管式サンド・サンプラー	80~100	70	2.0~2.5	1200~1400	10~12
砂質土(飽和)	三重管式サンド・サンプラー	600~700	70	1.5~2.0	1200	8~10
人工地盤(改良土)	コア・パックチューブサンプラー	0	70~80	1.5~2.0	1000~1300	3~5

除の効率が高いので100 kgf 付近の給圧でも泥水工法以上の掘進速度を得ることができた。

以上, 実施例に基づき気泡工法を利用したサンプリング法について述べてきた。気泡工法におけるサンプリング条件等をまとめたものが表-1である。

4. 原位置試験

ボーリング孔を利用した原位置試験には, 標準貫入試験, 孔内水平載荷試験, 透水試験等があり, これらの試験では孔内の緩みや乱れが試験結果に大きく影響すると言われている。一般にこれらの試験を行うためには, 孔内が乱れていないことが一番の要件であると考えられている。しかしながら従来の泥水工法でボーリングを行うと, 軟らかい地盤, 砂礫や軟質砂岩等の地盤ではこの条件を満たすことは困難な場合が多い。気泡工法によるサンプリングでは, 採取されたコアの状態から孔壁も同じように乱されていないと推測される。泥水工法と気泡工法の相違が原位置試験にどのように影響するかを見るために, 標準貫入試験におけるリバウンド量の測定と砂礫地盤の透水試験(ルジオン法)等を行い検討を加えた。

4.1 標準貫入試験におけるリバウンド測定

軟質砂岩の泥水工法によるボーリングでは, 孔壁周辺の地盤が循環水により吸収膨張することとスライム排除が十分でないことがリバウンド測定に影響を与えると予想される。そこで, 図-10に示す軟質砂岩において泥水工法と気泡工法で孔内原位置試験を実施し, その結果を比較した。標準貫入試験では目視法によりハンマーのリバウンド量(1cm単位)を測定した。孔内水平載荷試験は, エラストメーターを用い1段階2~4 kgf/cm², 保持時間2分の段階載荷とした。これらの試験に際しては, 掘削後直ちに行うなど試験条件に差が生じないように留意した。

実験結果を図-12, 図-13に示す⁴⁾。図-12は各工法によるボーリング孔での標準貫入試験時のリバウンド量の変化を示したものである。貫入回数10~20回までのリバウンド量において, 泥水孔では地盤が飽和している場合と不飽和の場合では大きな差異が認められるが, 気泡孔ではその差異が小さい。これは, 不飽和地盤では吸水膨張による影響が大きいことを示すものと考えられる。30~50回では両者とも一定の値に収束する傾向が認められ, 飽和地盤の方

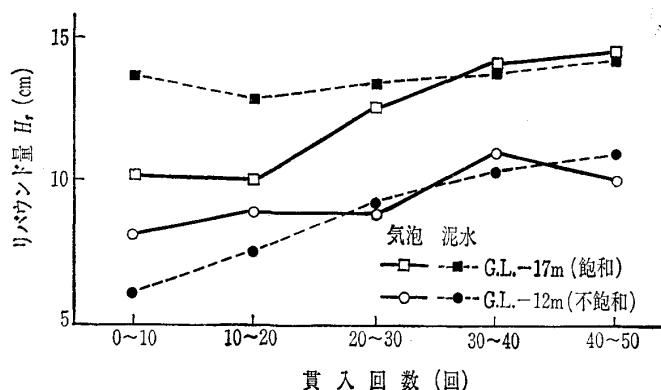
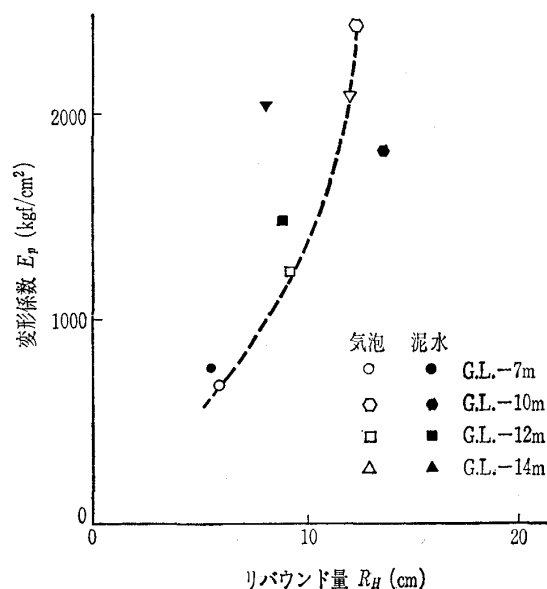


図-12 貫入10回毎平均リバウンド量

図-13 $E_p \sim R_H$ 相関図

がリバウンド量が多い傾向が認められる。図-13は同一深度付近で実施した孔内水平載荷試験から求めた変形係数と、標準貫入試験における平均リバウンド量(すべての貫入回数に対するリバウンド量の平均値)の関係を示したものである。泥水孔ではある程度の傾向があるもののばらつきが大きい。一方気泡孔では変形係数とリバウンド量の良好な相関性が示されている。

4.2 透水試験

砂礫地盤において泥水工法を用いたボーリング孔でのルジオン試験は、孔壁の安定性が悪く試験区間の確保が難しい。更に、パッカー部の止水性も悪く、セメンテーションを施しても被圧水や流動水により薄められたり、硬化後のリーミングで、片切れや肌落ちが生じるため止水性の向上は難しく、結果的に試験が不可能となる場合がしばしばある。

この問題点を解決すべく気泡工法とベントナイト・セメント孔壁保護工法を併用したルジオン試験を試みた。

気泡工法は地盤条件に併せて掘進速度を制御できることから、マトリックスを流失させることが少なく礫を動かさないで切削できる。したがって試験孔を自然地盤に近い状態に作成でき、かつ孔壁の安定性も良いため試験区間を比較的容易に保つことができる。パッカー背後のリーク現象については、気泡工法を用い乱れの少ない孔壁を形成しても止水性は十分でなく、更にセメンテーションを施してもリーク現象を完全に抑えることは難しく、したがってリーク現象を防止するためにはセメントに添加剤を加え付着力を高める方策を考えた。付着力を高める添加剤として固結度が低く泥水工法で孔壁保護に用いられているベントナイトを採用した。試験はルジオンテスト技術指針に準じて行った。その結果の一例を図-14に示す。図-14(a)はパッカー部の孔壁保護工法として従来のセメンテーションを施した時の P - Q カーブであり、低圧力においてリーク現象が生じている。一方、図-14(b)は孔壁保護にベントナイト・セメント工法を用いた時の P - Q カーブで、口元圧力 10 kgf/cm^2 でもパッカー背後からのリーク現象は全くみられなかった。このように、気泡工法とベントナイト・セメント孔壁保護工法を併用して試験を行うことにより砂礫地盤でも精度の高いデ

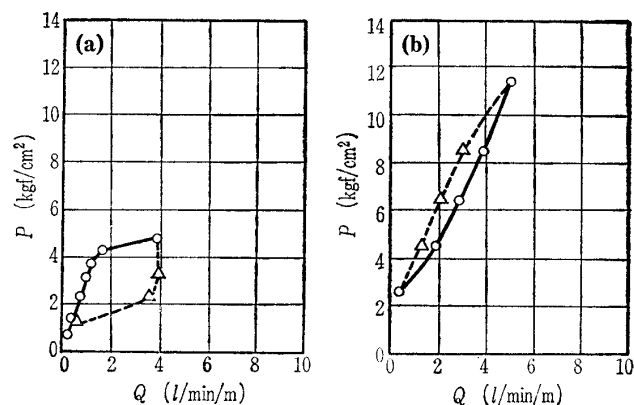


図-14 P - Q 曲線

ータが得られた。

5. あとがき

サンプリング等が極めて難しいとされていた砂礫地盤や軟質岩盤に対して、気泡工法を用いたサンプリング技術や原位置試験への適用性を検討してきた。その結果、対象地盤に適合したサンプラーと気泡の性状および発泡量を容易に制御できる気泡発生装置を用いることによって、比較的良質なサンプルの採取が可能であった。特に、気泡工法で難点とされていた地下水面以下の地盤に対してもその適用性が認められた。また、標準貫入試験によるリバウンド測定や孔内水平載荷試験等の原位置試験においても有効性を示唆していた。

このように、気泡工法を用いることによって今まで困難視されていた地盤についても信頼性の高い調査が可能となり、設計・施工に有益な情報の提供が可能となろう。しかしながら、適用事例が少ないことから今後は、さらに実績を積み、かつ、従来工法や地盤凍結工法等との対比実験を行いサンプルの品質評価などの検討を進めていきたいと考えている。

参考文献

- 1) 福富・横峯・松本・吉川：三重管サンプラーを用いた礫質土のサンプリング，昭和63年度サンプリングシンポジウム，pp. 41~46, 1988.
- 2) 土屋・赤星：小型軽量ボーリングマシン及びフォームボーリングについて，技術ニュース (32)，pp. 19~27, 1988.
- 3) 唐沢・徳丸・塚田・関田：J.F.B 工法による砂礫地盤のサンプリング手法，第24回土質工学研究発表会，pp. 213~214, 1989.
- 4) 徳丸・上田・塚田：軟質岩盤における気泡ボーリングと原位置試験結果，第23回土質工学研究発表会，pp. 121~122, 1988.

(原稿受理 1990.1.29)