

堆積軟岩のボーリング調査について思うこと

奥原茂弘

1. はじめに

我々が日常感覚的に「岩（石）」と認識しているものに比べるとはるかに軟らかいが、土よりは明らかに硬いという地質材料を軟岩と呼ぶ。すなわち、軟岩とは土と岩（石：硬岩～中硬岩）の中間に位置する固結度の低い岩のことである。

一般に、軟岩はその成因から、①堆積軟岩 ②風化軟岩 ③火山軟岩の3種類に大別される（土木学会岩盤力学委員会、1984）。

堆積軟岩は砂や粘土が固結してできた軟岩で、岩になりつつある岩である。これに対し、風化軟岩は岩石が風化して生じた軟岩で、花崗岩のマサに代表されるような土に帰りつつある岩である。火山軟岩は火山の噴火によって短時間に形成された軟岩で、固結度の低い溶結凝灰岩（シラス）に代表される。

これらは何れも一軸圧縮強度が100～200（kg/cm²）以下という点で共通点を持つが、その工学的性質は構成材料（岩石）自体の物性に大きく左右されており、堆積軟岩と風化軟岩、火山軟岩とは自ずとその性質が異なっている。

軟岩の分布は日本全国に及ぶが、我々の活動の舞台である東北地方は北上・阿武隈地域を除くと大部分がグリーンタフ地域に属するため、分布する軟岩の主体は堆積軟岩となっている。このため、我々はダムや橋梁の基礎として、あるいはトンネルの地山として堆積軟岩とつき合う機会が多い。

このような理由により、小論では堆積軟岩を対象とするボーリング調査について日頃感じていることを述べたいと思う。

2. ボーリングで岩の硬軟はどこまで把握できるか

2.1 岩の硬軟と岩盤の掘り易さ

一般に、調査ボーリングは次の3点を主な目的として実施される。

- ① 採取されたコアを肉眼で直接観察し、地質構成や岩盤性状を把握すること。

- ② 孔内で原位置試験を実施し、岩盤の強度や変形性、透水性、各種物性を明らかにすること。
- ③ コアを用いて室内試験を行い、その工学的性質を明らかにすること。

このため、調査ボーリングでは孔荒れを防ぎながらコア採取率を高めることが最大の課題であり、地盤の状況に応じて削孔条件を適宜変化させ、コア採取率の向上を図ることがオペレーターに求められている。したがって、コア採取率や採取された試料の性状はオペレーターの技術レベルに左右されることが多い。

ところで、ボーリングにおいて掘進という工程は、基本的には岩を削り進む作業である。そして、岩の削り易さは第一近似としてその硬軟、すなわち岩の強度と対応する性質である。このことから、岩盤に発達する亀裂の状態がほぼ同じであるならば、岩盤の掘り易さは岩の硬軟と深く関係しているものと考えられよう。

このような観点から、削孔データを用いて岩盤の強度を推定しようとする試みが過去に行われているが（小島、1987；中村・石塚、1983）、未だ試行段階であり、十分な成果は得られていない。しかし、硬質な岩と軟質な岩で削孔条件が異なることは日常経験するところである。そこで、この点を明らかにするため、ある熟練オペレーターのマシン操作に着目し、地質の違いに応じて削孔条件をどのように変化させているかを整理してみた。

2.2 岩の硬軟と削孔条件

表1.は、ある熟練オペレーターが、地質は異なるが亀裂の発達状況がほぼ同じである岩盤に対してボーリングを行ったときの削孔条件を日報から拾って整理したものである。



表1. 岩の硬軟と掘進条件

サイト	A ダム	B ダム	B ダム	C ダム
地質	中新世の細粒砂岩	鮮新世の火山碎屑岩 自破碎溶岩	鮮新世の安山岩溶岩	白亜紀の砂岩 (ホルンフェルス)
岩区分	堆積軟岩 Cm	中硬岩 CM	硬岩 CM	硬岩 CH
圧縮強度 (kg/cm ²)	50~150	300~500	800~1,500	1,500~2,500
クラウン	サーフェイス	インプリ	インプリ	インプリ
掘進速度 (kg/h)	200~500	80~100	130~150	100~200
給圧 (cm/cm ²)	200~300	500~600	500~600	600~800
回転数 (r/min)	160~200	80~120	150~200	150~200
送水圧 (kg/min)	2~3	5~7	5~7	5~7
送水量 (l/min)	20	20	20	30~40

これによると、①軟岩と硬岩～中硬岩では使用するビットが異なること、②給圧を低めに抑えれば、回転数を上げて軟岩でもコアづまりすることなく硬岩～中硬岩の2～3倍の掘進速度が得られること、③軟岩では送水圧を硬岩～中硬岩の半分以下に抑えていること、などが分かる。また、回転数に大きな違いのないことから、掘進速度は給圧と対応しており、それは岩の硬軟と深い関係にあるのではないかと推測される。

これらを確認するのは今後の課題であるが、1つの希望的観測として、給圧および回転数が一定という条件のもとでは、掘進速度によって岩の硬軟をある程度定量的に把握できる可能性があるものと思われる。

このように、調査ボーリングでは削孔データそのものが岩盤を評価する上で重要な資料となる。すなわち、調査ボーリングにおいては、掘り上がったコアばかりでなく、掘る過程そのものも重要な調査になっているのである。

したがって、試錐日報はでき形管理のためばかりにあるのではないということ、掘る側も管理する側もよく理解しておく必要があると思われる。

3. ルジオンテストで軟岩の透水性はどこまで正しく評価できるか

3.1 ルジオンテストで圧入した水の通りみち

岩盤の透水性を評価する上でルジオンテストは欠くことのできない孔内原位置試験

である。このため、ダム地質調査では軟岩・硬岩を問わずルジオンテストが実施されている。そこで、改めて、ルジオンテストで評価している岩盤の透水性と、圧入した水の通りみちについて考えてみたい。

Aダムは堆積軟岩を基礎とするダムである。河床部からアバットの中部にかけて一軸圧縮強度100 (kg/cm²) 前後の細粒砂岩が分布するがその一隅でテストグラウチングを実施した。テストグラウチングでは、チェックボーリングで改良効果を目視調査できるように、孔の次数別にセメントミルクに異なる色素を混ぜ注入を行った。数年後掘削を行ったところ、岩全体に色素が染みわたり、原岩と異なる鮮やかな色調を呈している部分の存在することが確認された。このことから、Aダムの基礎岩盤については、岩組織そのもの、すなわち空隙を水みちとする浸透流の存在することが確証された。

軟岩が「土」と「(日常感覚的な) 岩」の中間的地質材料であることを考えると、軟岩からなる岩盤にこのような様式の浸透流が存在することは当然のことと言える。したがって、軟岩からなる岩盤では、浸透流に2つの水みちが存在することになる。すなわち、1つは岩盤に発達する割れ目系であり、もう1つは岩組織そのもの、すなわち空隙である。

このように、軟岩の透水性はこの両者で構成されるものであり、これらが正確に把握されて初めて正しく評価できるものである。そこで、次に空隙を水みちとする浸透流について考えてみることにする。

3.2 P-Q曲線から読みとれるもの

空隙を水みちとする浸透流は、拡散・浸透性の遅々とした流れであると考えられる。これをルジオンテストで確かめ、透水性を評価することはできるであろうか。

ここで1例として、Aダムにおけるルジオンテストの結果を取り上げる。

前節で述べたように、Aダムでは堆積軟岩がダム基礎の主体をなしており、その大部分は一軸圧縮強度100 (kg/cm²) 前後の細粒砂岩である。ここで実施したルジオンテストの結果を整理すると、P-Q曲線は図1.に示すようないくつかのパターンに分けられる。

A型はこのダムで最も多く出現するパターンで、堆積岩類のP-Q曲線の大部分はこの型に属する。この型では、P-Q曲線は一般に地下の浅所から深部に向かってⅢ→Ⅱ→Ⅰと進化して行くことが認められる。

Ⅲは折曲り点が複数存在する多点折曲りP-Q曲線で、全体として上に凸の曲線を描く。限界圧力は原則として最初の折曲り点から決めることとしたが、その大きさは一般に深度とともに上昇し、換算ルジオン値は漸減するという傾向が認められる。ⅡはⅢが進化し、明瞭な折曲り点が1つになったものである。ただし、折曲り点より下の部分が緩い弧を描く準直線的なものと、ほぼ完全な直線であるものとが識別される。この単点折曲りP-Q曲線では、限界圧力は10 (kg/cm²) 以上であることが多い。ⅠはⅡがさらに進化したもので、P-Q曲線は直線または準直線で、明瞭な限界圧力を示さないものである。

前述のように、試験対象となっている堆積岩類はそのほとんどが一軸圧縮強度100 (kg/cm²) 前後の軟質な細粒砂岩である。しかし、このような岩であっても、上載荷重が十分ある所ではどこでもこのパターンが見られる。

B型は全体に下に凸の緩やかな曲線を描くパターンで、注入圧を上げてその割に水が入りづらいという特徴を持っている。C型は全体にS字型または逆S字型を描く複合曲線で、様々なバリエーションがある。限界圧力のとりかたについて明確な基準を設けることができず、ケースバイケースで処理しなければならないP-Q曲線が多く出てくる型である。

なお、これらのいづれにも属さないパターンがあり、D型として一括されている。

ここで、AⅠまたはAⅡ型のP-Q曲線に着目する。

既に述べたように、これらのP-Q曲線は直線的で、ルジオン値は多くの場合1 (Lu) 以下となっている。このため、一般には、これらのパターンで示される岩盤は事実上不透水性であると評価されている。しかし、僅かながら水が入っているということは、これが計器の誤差や漏水が原因でない限り、岩盤に水が浸透した結果と考えざるを得なくなる。そして、このときの水みちは岩組織そのもの、すなわち空隙ということになる。



P - Q 曲線のパターン	
A (直線型)	<p>I. 直線的または準直線的な P-Q</p> <p>II. 直線的な P-Q で明瞭な折曲り点の一つ存在する。</p> <p>III. 折曲り点が複数存在し、全体として上に凸の曲線を描く。</p>
B (曲線型)	<p>I. 下に凸の曲線で $P_{max} > 10$ (kgf/cm²)</p> <p>II. 下に凸の曲線で $P_{max} < 10$ (kgf/cm²)</p>
C (複合曲線型)	<p>I. 直線的に立上がり、$P_c > 10$ で下に凸の曲線を描く。</p> <p>II. 全体に緩やかな S 字型または逆 S 字型の曲線で限界圧力は不明瞭なことが多い。</p>
D (その他)	<p>上記のいずれにも属さないパターン</p>

図 1. Aダムにおける P-Q 曲線のパターンと分類

このような浸透流ではダルシーの法則が成立し、注入試験においては、透水係数 k は次式で与えられる。

$$k = \frac{Q}{2\pi LH} \ln \frac{L}{r} \quad (\text{cm/sec})$$

ただし、 Q ：単位時間当りの注入量 (cm^3/sec)

L ：試験区間長 (cm)

H ：有効注入圧力

r ：試験孔の半径 (cm)

これによれば、 1 (Lu) は $k = 1.3 \times 10^{-5}$ (cm/sec) であり、 1 (Lu) 以下であれば透水係数のオーダーは 10^{-6} 以下となる。すなわち、岩そのものの透水係数は極めて小さく、ルジオンテストの結果で議論できるようなものではないと考えられる。

したがって、軟岩から構成される岩盤においても、圧入された水の逃げ道は基本的には割れ目系であり、岩組織そのものを水みちとして逃げて行く水の量は無視しうるほどに小さいと考えても差し支えない。多くの成書には次のようなことが記されているが（例えば、建設省河川局開発課監修、1984）、それをルジオンテストで確認し評価するという事は至難の技と言えよう。

…… 硬岩では一般に岩石自体は不透水とみなすことができ、浸透流は岩盤内の割れ目のみを流れる。これに対し、軟岩では岩石の組織自体に空隙があって透水性である場合があり、なおかつ割れ目をもつ場合もあって複雑である。すなわち、浸透流の状態は硬岩ではパイプフローであるが、軟岩ではダルシーフローである場合もあるし、ダルシーフローとパイプフローの両者が存在している場合もありうる。……

3.3 限界圧力の意味するもの

軟岩では、注入圧力を段階的に上げて行くとある圧力の所から注入量が急激に増大し、 $P-Q$ 曲線に折曲りの生じることがよくある（図2.）。この時の圧力を限界圧力とよび、 P_c (kg/cm^2) と書き表す。試験装置に問題がなければ、注入量が急増する原因としては次のことが考えられる。

- ① 岩盤の割れ目を充填している細粒分が洗い流され、水の通りがよくなる。
- ② 岩盤内の潜在亀裂が開口して水みちとなる。
- ③ 岩盤内に新たに亀裂が発生して水みちとなる。

これらのうち、②と③は本質的に岩の引張強度と上載荷重に関係するものである。そこで、次に既存の割れ目が開く条件と新たに亀裂が発生する条件について考える。

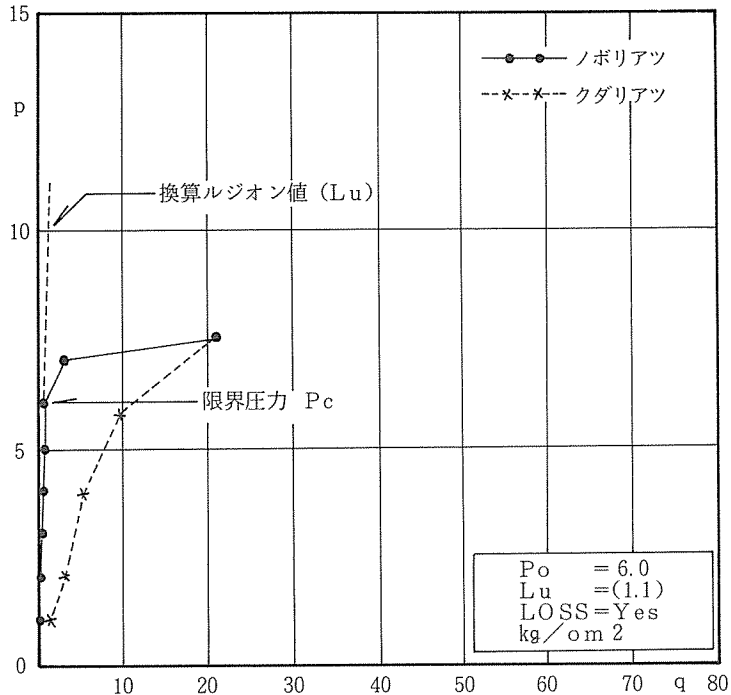


図2. 限界圧力のみられるP-Q曲線の例

話は少しとぶが、石油の産出量を増やすために開発された技術で、水圧破砕法 (hydro-fracturing method) と呼ばれるものがある。これは油井に多量の水を送り込んで孔壁を加圧・破壊し、石油の滲出表面積を広げて採油能力を高めようというものであるが、現在では地震予知とも関連し、地山応力の測定にも中心的な役割を果たしている。水圧破砕法が応力測定に利用される理由は次に記す理論的根拠による。(塚原ほか、1978)。

水圧破砕法の原理

無限に広がった岩盤中に深い鉛直の円孔がある場合を考える。

岩盤には既存の割れ目がなく、不透水性であるとする。また、力学的には等方的で、破壊直前まで弾性体として振舞うとする。円孔の周囲には水平圧縮応力が作用するが、そのうちの大きい方を σ_{Hmax} 、小さい方を σ_{Hmin} とする。また、岩盤を構成している岩石の引張強度を T 、既存の間隙水圧を P_0 とする。

円孔に水を注入し、徐々にその圧力を高めて行くとある圧力で孔壁に割れ目が生じる。その時の圧力を Pb^0 (破壊水圧: breakdown pressure) とすると、これらの間には次式が成り立つ。なお、この時に発生する割れ目は、 σ_{Hmin} と垂直の方向であ

ることが理論的に予想される。

$$Pb^0 = 3 \sigma H_{min} - \sigma H_{max} + T - P_0$$

割れ目の発生後注入を停止すると、割れ目内の水圧と σH_{min} が平衡に達するまで、すなわち割れ目が閉じるまで水が逃げて行く。割れ目が閉じたときの水圧を P_s (割れ目開口圧: instantaneous shut-in pressure) とすると、

$$P_s = \sigma H_{min}$$

である。

さらに、再注入を行って閉じた割れ目を再び開口させる。その時の圧力を Pb^1 (割れ目開口圧: reopening pressure) とすると、これは引張強度 T が 0 の孔壁が水圧破碎されるときの水圧に相当する。よって、

$$Pb^1 = 3 \sigma H_{min} - \sigma H_{max} - P_0$$

である。

したがって、 P_s 、 Pb^1 、 P_0 を測定することにより、 σH_{min} 、 σH_{max} が求められるというものである。

以上のことから、岩盤を破壊するために開発された水圧破碎法が、実は透水性を評価するために考案されたルジオンテストと近縁の技術であることが理解されるであろう。それにもかかわらず、これまで両者が同時に語られる機会はほとんどなかったように思われる。

水圧破碎法による地山応力の測定は、日本では国立防災科学技術センターによって1978年以来実施されている(塚原ほか、1978; 塚原・池田、1984など)。これらの測定では、ボーリング孔の口径は160 (mm) であり、測定深度も70~800 (m) と大きく、破壊水圧 Pb^0 も50~100 (kg/cm²) と大きな値になっている。

このように、ボーリングの孔径、削孔深度、注入圧力のいずれをとっても水圧破碎法による応力測定はスケールが大きく、我々が日常携わっている調査ボーリングとは感覚的な開きが大きい。これまで両者が対置されなかった理由はこのあたりにあるかも知れない。しかし、最近では水圧破碎法による応力測定も3次元で展開できるようになり、任意の方向に掘った小口径の孔(46~56mm)でも測定が行われるようになってきた(黒石ほか、1988)。このような状況変化を考えると、ルジオンテストと水圧破碎法は今後急速に歩み寄ってくるのではないかと期待される。

そこで、改めて両者を比較してみると、本節の冒頭で述べた限界圧力の原因につい

ては、次のように理解することができるであろう。

- ① 岩盤内の潜在亀裂が開口するときの圧力というのは、水圧破碎法でいうところの割れ目開口圧 Pb^1 であり、
- ② 岩盤内に新たに亀裂が発生するときの圧力というのは、水圧破碎法でいうところの破壊水圧 Pb^0 である。

3.4 限界圧力の推定

規則的ではないにしても、限界圧力が深度と共に大きくなることは日常的に経験するところである。これは、限界圧力が上載荷重となんらかの関係があることを示すものと考えられる。

そこで、水圧破碎法とは逆に、ある仮定を設けて $\sigma Hmin$ や $\sigma Hmax$ を推定し、割れ目開口圧すなわち限界圧力を推定することを試みる。ここで設ける仮定は次の2つである

- ① 深度が余り大きくない所では $\sigma Hmin = \sigma Hmax$ であり、重力加速度を g (cm/sec^2)、ポアソン比を ν 、岩の平均密度を ρ_{rock} (g/cm^3)とすると、それらは上載荷重 σu と次の関係式で結ばれる。

$$\sigma Hmin = \sigma Hmax = \frac{\nu}{1-\nu} \sigma u \quad (\text{dyn/cm}^2)$$

$$\sigma u = \rho_{rock} g z \quad (\text{dyn/cm}^2)$$

- ② 既存の間隙水圧は水頭圧とする。

これらの仮定のもとに限界圧力 P_0 を求めると次の通りである。

$$P_c = Pb^1 = 3 \sigma Hmin - \sigma Hmax - P_0$$

$$= 2 \frac{\nu}{1-\nu} \rho_{rock} g z - \rho_w g z_0$$

ここでAダムの河床部を例えにとれば $\rho_{rock} = 2.1$ (g/cm^3)、 $\rho_w = 1.0$ (g/cm^3)、 $z = z_0$ (cm)であり、ポアソン比を $\nu = 0.3$ と仮定すれば、限界圧力は深度の関数として次のように表される。

$$P_0 = 0.80 g z \quad (\text{dyn/cm}^2)$$

$$= 8.0 \times 10^{-4} z \quad (\text{kg/cm}^2)$$

すなわち、Aダムにおける限界圧力の上昇率は、深度10 (m)につき0.8 (kg/cm^2)ということになる。これは実際に得られた値よりも小さいが、深度とともに限界圧力が徐々に大きくなることをよく説明している。

次に、岩盤内に新たに亀裂の発生する場合を考える。

この時の圧力は、岩の引張強度を T (kg/cm^2)として次式で与えられる。

$$Pb^0 = Pb^1 + T$$

岩の引張強度は圧縮強度に比べるとかなり小さく、堆積岩では1/10~1/30といわれ

ている（三木、1982）。しかし、圧縮強度が100（kg/cm²）の軟岩であっても、5（kg/cm²）程度の引張強度は期待できることになる。ルジオンテストで扱う圧力範囲が高々10数（kg/cm²）であることを考えれば、これは決して小さな値とはいえない。すなわち、岩盤中に既存の割れ目がある場合には、水を圧入しても新しい割れ目が発生する可能性はほとんどないのである。

4. お わ り に

日常業務として普段何気なくこなしているボーリング調査も、一步踏み込んで考えてみると、理解していない点が余りにも多いことをいやというほど思い知らされる。ここで取り上げた話題もその一部であるが、浅学と経験不足のため、とんでもない思い違いをしているかも知れない。

しかし、それにも拘らずここで敢えて話題を提供をしたのは、実務に携わる者にとって意義のあることと考えたからである。読者諸兄の御寛容をお願いして、終わりの言葉としたい。

引 用 文 献

- 土木学会岩盤力学委員会（1984）：「軟岩一調査・設計・施工の基本と事例一」、287 p、土木学会
- 建設省河川局開発課監修（1984）：「ルジオンテスト技術指針・同解説」、56 p、国土開発技術研究センター
- 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。土木技術資料、25（1）、9-16
- 黒石裕樹・小笠原宏・竹内智一・田中豊・水田義明（1988）：小口径3次元水圧破壊法による地殻応力の繰り返し測定一六甲諏訪山実験坑一。地震2、41（2）、203-213
- 三木幸蔵（1982）：「わかりやすい岩石と岩盤の知識」、318 p、鹿島出版会
- 中村康夫・石塚克己（1983）：ボーリング掘進データによる岩石の強度推定に関する実験的検討。土木技術資料、25（1）、20-25
- 塚原弘昭・池田隆司・佐竹洋・大竹政和・高橋博（1978）：静岡県岡部町における水圧破壊法による地殻応力の測定。地震2、31（3）、415-433
- 塚原弘昭・池田隆司（1984）：水圧破壊法による地殻応力測定一深度100~800mの測定孔での測定結果。第6回岩の力学国内シンポジウム講演論文集、367-372
- （日本工営株式会社）