

ダム基礎岩盤のグラウチング施工指針(案)について

Foundation Grouting of Concrete Dams

土木学会岩盤力学委員会委員 山 口 登 (水資源開発公団)

まえがき

近年、各種の目的をもつ大小多数のダムが計画、建設されているが、ダムの数が増加するに伴ってダムサイトの地質条件が必ずしも良好でないところにもダムの建設が要求され、岩盤処理工による基礎岩盤改良の重要性がますます大きくなっている。

「ダム基礎岩盤のグラウチング施工方針」(案)は、現場技術者にとって、グラウチングの一般的な技術面における糧となりうるが、実際の施工に当っては、工事の実績を通して、絶えず計画の妥当性を確かめ、必要あれば修正しながら、その現場に適したグラウチング法を見出して行くことが大切である。

以下、同指針(案)における要点について簡単に述べる。

§ 1. グ라우チング計画のための調査(とくにルジオンテストについて)

ダムサイトおよびその周辺の地質構成については、ダム計画時の地質調査によって把握されているが、これをもととして、グラウチング計画に必要な地質構成および岩盤の水透性などについての資料をうるため、ボーリングなどによって地質調査を行なう。調査の重点項目としては、1) 基礎岩盤内に発達する割れ目の規模、頻度、夾雑物の状態、割れ目の方向性と連続性、2) 異なる地層の境界面の形態、3) 岩盤の透水性、4) グ라우チングによる改良の見通しなどが挙げられる。この調査は、グラウチング計画区域内において、ボーリングによって行なわれることが多いが、この場合には、孔径を6 mm以上として、コアの採取率を高め、その範囲はダムサイトの地質によっても異なるが、ダム軸がほぼ決定された段階、あるいは、施工段階の初期において、数本のボーリングによって、河床部のみならず左右両岸上部においても、少なくともダムの最大水深の半分程度の深さまでの地質状況を確認しておくことが望ましい。とくに地質上問題がある場合には、この範囲をダムの最大水深以上とすることもある。また、予定深度附近で地質が良好でない場合は、ボーリングを打切らず延長する必要がある。ボーリングに際しては、必ずルジオンテストを併用して、総合的な地下の情報を集める。

グラウチングの計画、施工に当って、ダム基礎岩盤の透水性を知ることは不可欠である。本指針では、基礎岩盤内の透水性を求める方法として、*ルジオンテストを採用し、岩盤の透水性をルジオン値をもって表わすこととし、これを指針を通じての柱としている。ルジオン値は複雑な岩盤内の状態を総合した Index と考えることができ、計画の立案および修正、注入方法、追加グラウチングおよび注入効果の判定など施工実績などをふまえて工事を進めて行く際に、最も簡単にえられ最も有力な判定資料となるものである。

* ルジオンテストとは、M. Lugeon が提唱した岩盤の透水性を測定するため、ボーリング孔(φ40～80 mm)を利用して行なう水圧透水試験をいう。この試験においては、透水性を表わす尺度として“Lugeon(ルジオン)”という単位を用いているが、1 ルジオンとは、10 kg/cm²の圧力の下でボーリング孔長1 m 当り 1 ℓ/min の透水量を指している。

計画の初期に行なうルジオンテストは、グラウトカーテンの予定位置で河床部および左右両岸上部において、少くともダム最大の水深の半分程度の深さまで行なうことが必要である。とくに地質上問題のある場合にはダムの最大水深にほぼ等しい深さまで行なうこともある。これは河床部では水圧が高く、また上部では岩盤がゆるんで風化していることが多いからである。なお、計画深度附近でルジオン値が大きい場合には、さらに延長する必要がある。

ルジオンテストには、

- 1) 孔径、ゲージの位置、ステージ長などが統一されていない。
- 2) 地下水位のような境界条件が明確でない。
- 3) 注入圧力を10 ㍻とする根拠がとくにない。

など不備な点があるが、比較的簡便にテストできること、実用的に岩盤の透水性の大小を知ることができる。直接ボウリング孔に水を圧入するのでグラウチングの資料をえやすいなどから広く用いられている。

上記のような不備な点を含むルジオンテストからえられるルジオン値を、さらにダルシーの式で定義される透水係数と直結させるのは、不規則な割れ目や空けきの存在する基礎岩盤においては問題点もあるが、径40～80 mmのボウリング孔の場合1ルジオンはほぼ 10^{-5} cm/secに相当している。

ルジオンテストを行なう場合の注入圧力は10 ㍻を基準としているが、地質の悪い岩盤や低いダムなどにおいては、基準圧力10 ㍻をかけられない、あるいは、かける必要のない場合、またカーテングラウチングなどにおいて、注入圧力に近い10 ㍻以上の圧力をかける場合など、基準圧力10 ㍻を採用しない場合には、注入圧力比例で換算してルジオン値を求めることが一般に行なわれる。換算ルジオン値は次式で求める。

$$L_u = \frac{10 \cdot Q}{P \cdot \ell}$$

ここに L_u ; ルジオン値

Q ; 注入量 (ℓ/min)

P ; 試験圧力 (㍻)

ℓ ; 試験区間の長さ (m)

ルジオンテストを行なう場合、

良好な岩盤では、通常注入圧力が10～15 ㍻の範囲では、注入圧力 (P) と注入量 (Q) とは比例することが認められているが、さらに圧力を上げると図-1 a 線のごとく、ある圧力 (本指針では限界圧力と呼び、注入圧力決定の一要素としている。) 以上では、 P と Q は比例せず Q が急激に増加する。したがって、良好な岩盤におけるカーテングラウチングなどでは、注入圧力に近い10 ㍻以上の圧力でテストする場合には、換算したルジオン値は実際より大きめの値となることになる。また一方、風化の進んだ岩盤では、小さい圧力より P と Q との比例関係は成立せず、図-1 の b 線のように P につれて Q は急激に増加する。一般に風化の進んだ岩盤では大きな注入圧力を採用すると基礎岩盤に有

害な変位を生じさせる危険があるので、10%以下の圧力で試験しなければならない。このような場合、換算したルジオン値は実際より小さい値を示すので注意する必要がある。

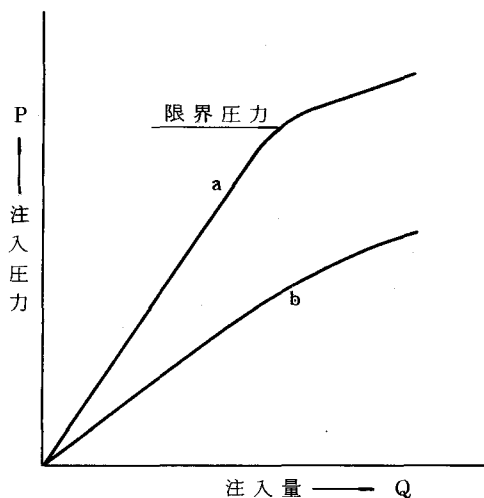


図1. 注入圧力と注入量との関係

ルジオンテストの注入圧力として、テストするステージの midpoint における値をとる場合と、孔口での値をとる場合とがあるが、本指針では後者を採用している。しかし、とくに湧水がある場合や上向きの孔の場合、その他必要のある場合などでは誤差が大きくなるので修正することが多い。通常基礎グラウチングの施工中に湧水その他の境界条件やその変化を把握することは甚だ手間がかかり、また、パッカーのセットなどにも不確実な点があるためルジオン値にはある程度の誤差が含まれる、換算の手間をはぶくことができ、孔口での値をとることは安全サイドであるなどの理由から、注入圧力として孔口での値を用いることとしている。

ルジオンテストのほか、グラウチング計画、施工に必要な資料をうるため、ダムサイトの現位置でグラウチングテスト（試験グラウチングとも呼ばれる）を行なう。地質変化の多い我が国では、個々のダムサイトごとに岩盤条件が異なり、すでに完成したダムのグラウチング実績を参考とすることはあっても、そのまま適用できる例はほとんどない。前述のルジオンテストによって基礎岩盤の大よその透水性は推定できることができるが、ダムサイトの一部で実際にグラウチングを行ない、下記の1)～4)の各種の資料をえた上で本工事に着手することが望ましい。一般に、本工事と切離して事前にテストを行なうことは、種々の点より無駄であるため、本工事の初期に実際のグラウチング孔を用いて実施することが多い。グラウチングテストにおける主要調査項目として、

- 1) グ라우チングによる改良の見通し
- 2) グラウト孔の間隔、パターンを選定
- 3) 注入圧力の決定
- 4) 施工基準の決定、積算資料の収集

などが挙げられる。

§ 2. 注入に影響を及ぼす要素（とくに注入圧力について）

注入効果に影響を及ぼす要素としては、注入圧力、グラウトの配合および注入ステージ長などが挙げられるが、この中で注入圧力の増加による注入効果の増大度が通常最も大きいと考えられる。ルジオンテストの際に注入圧を除々に昇圧すれば、圧力上昇とともに注入量も増大し、限界圧力に達したとき、注入量が急激に増大する現象が認められる（図-1参照）。注入の効果は、その孔に対する注入量の多少で示されるものと考えれば、この現象から注入圧力が大きいほど注入効率が良くなり、さらに限界圧力に達すれば注入量が急増する。したがって、グラウチングは、岩盤内のき裂や割れ目にグラウトを圧入することが主目的であるから、後述の単位注入量や全注入量の管理を行なった上でできるだけ大きな注入圧力で作業するのが良いと考えることができる。できるだけ高い圧力による注入が良いとはいえ、過大な圧力によって岩盤を持ち上げたり、横方向にはらみ出させたり、ダムなどの構造物に有害な変位を生じさせてはならないことは当然である。とくに、限界圧力附近での注入には、厳重な注入量の管理が必要である。また、ダムの基礎として不必要な範囲にグラウトが逸散することは不経済となるが、高い圧力ではその可能性が高くなるので十分注意する必要がある。

従来用いられて来た注入圧力は、注入箇所のかぶり、基礎岩盤の状態などに応じて決定されていたが、経験的に決められている場合が多く、コンソリデーションにおいて $0.4 \sim 0.6 d$ ㈬ (d は孔の深さ (m)), カーテンにおいて $0.5 \sim 1.0 d$ ㈬が最大値の目安を与えることが多い。

上述の注入圧力は、比較的小さいので圧力と注入量の関係を取り上げることはなかったが、最近より高い圧力で効果的なグラウチングを行う例が見られるようになって来た。これは構造物や岩盤に危険な影響を与えるのは、単に岩盤のき裂中のグラウトの圧力の強さでなく、それによって生ずる全揚圧力であると考え、全揚圧力を制限することによってより高い圧力で安全に注入しようとするものである。全揚圧力は同一注入圧力のもとでは作用面積に比例し、き裂巾が一定であれば単位注入量 ($\ell/\text{min}/\text{m}$) と全注入量に関係するので、単位注入量と全注入量を規制することによって作用面積を制限し、全揚圧力を安全な範囲内に押えることができる。黒四ダムにおいては、単位注入量を $1 \sim 2 \ell/\text{min}/\text{m}$ 、1ステージ長当りの全注入量を $1,000 \ell$ に押え、良好な岩において $1 \sim 2 d$ の注入圧力を、また、すでに注入を行った部分においては、全注入量を $2,000 \ell$ に押え、 $2 d$ の注入圧力を採用している。この種のグラウチングにおいては、どのような圧力のときどの位の注入量が適当かの判断が非常に重要であるが、これに経験的なもので、往々にしてその判断を誤り、岩盤を動かしてしまう例があるので注意しなければならない。したがって、高い圧力を採用するときは、圧力と同時に注入量の厳重な管理が必要であり、注入量が増大すれば自動的に圧力がコントロールされる吐出量調整型ポンプを使用する（この注入方法を本指針では注入量を「規制する注入方式」と呼んでいる）とともに、注入圧力、または、単位注入量を自動的に記録する装置を取付けるなど施工に際して十分注意する必要がある。

注入圧力については、前述のごとく従来から経験的に用いられて来た比較的小さな圧力を採用する場合と注入量の管理のもとにより高い圧力を採用する場合とがあるが、本指針においては両者に対する結論を出すまでに至らずこれらを併記し、とくに高い圧力での注入に際しては厳重な圧力および注入量の管理の必要なことを強調しているに止めている。

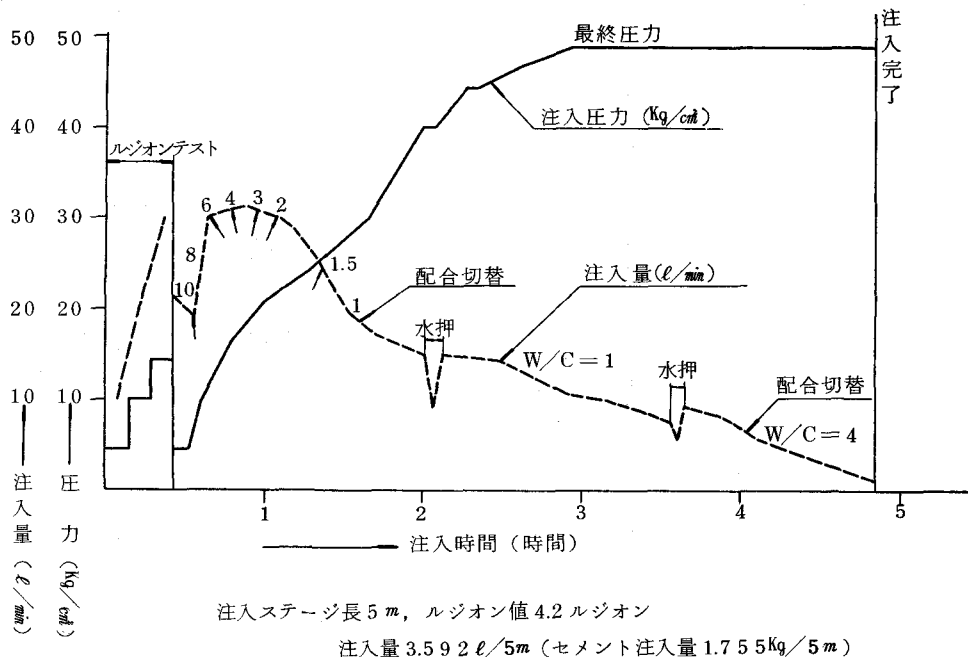


図 2. 奈川渡ダムにおける代表的な注入曲線

§ 3. カーテングラウチングの施工範囲および注入孔の配置

カーテングラウチングの計画するに当り、どの現場においても、施工範囲をどの程度までとするか、また、注入孔の配置をどのようにするかを決定することは、直接工事費に影響を及ぼすもので大いに頭を悩ますことである。

カーテングラウチングの施工範囲を決定するには、従来経験式によって深度を決定することが多かったが、近年計画されるダムには、高さに比べて必ずしも岩盤の良好であるとは云い難い場合も見受けられるようになり、基礎岩盤に対する調査などの結果をもととして範囲を決めるようになって来ている。カーテングラウチングの施工予定位でのルジオンテストの結果は、範囲決定の有力な手掛りとなるので、カーテングラウチングの初期の段階で、ダムの河床部のみならず左右両岸上部においても、ダムの最大水深の半分程度までルジオンテストを行なうことが必要である。ルジオンテスト結果、ルジオン値が深部に行くほど低くなって行く岩盤では、ダムの高さ、型式および岩質により、グラウチング前の岩盤のルジオン値が 1～5 ルジオン程度の透水性を示す部分までの範囲を目標とする例が多い。深部では、岩盤内の浸透路の長さを考慮してもっと高いルジオン値とする場合もある。ルジオン値が深部へ行っても低くならない場合には、専門技術者による特別な検討が必要である。また、低いダムの場合、高いダムで採用される 1 ルジオンと云うような低い値の範囲までグラウチングするのは、施

工量が過大になる場合も考えられるが、現状では決め手がないので低いルジオン値になる範囲まで施工することが多い。

カーテングラウト孔の配置は、実績からみて0.5～3.0m程度の1列、または、2列で施工される例が多い。グラウト孔の間隔および列数を決定する要素として、

- 1) ルジオンテスト、グラウティングテストの結果
- 2) 地質の状況
- 3) 浸透流の影響
- 4) 注入材料、注入圧力

などが挙げられるが、施工中常に実績を見ながら、必要あればグラウト孔のパターンの修正を行うことが必要である。

§ 4. カーテングラウティングの注入効果の判定

カーテングラウティングの効果は、各グラウト孔での注入過程における注入量、ルジオン値などの変化度やチェック孔におけるルジオン値などを総合して判定し、所定のルジオン値に達していなければ追加グラウティングすることが必要である。

カーテングラウティングでは、普通パイロット孔、第1次孔、第2次孔などの順序で間隔を小さくして施工される。これらの注入順序に従った各次孔のルジオン値およびセメント注入量の減少度は、注入効果を判定する有力な資料となる。

ある範囲のグラウティングが完了した後に行なわれるチェック孔は、注入効果判定の最後の決め手となるもので、必ず実施することが望ましい。チェック孔は、カーテングラウティングの範囲を平均的にカバーするような配置を考え、その孔間隔は15～20mごとにグラウティング孔に斜交するようにするとともに、工事中とくにルジオン値、注入量などの多い部分や、問題となるような断層などにも実施すべきである。注入効果は、ルジオンテストの結果から判定する。その場合チェック孔によるルジオンテストの結果は、チェック孔の全ステージ数のうちある範囲以上が目標ルジオン値以下となることが望ましい。目標ルジオン値は、コンクリートダムの場合ダム着岩部附近、その他重要な部分に対して普通1～2ルジオン、ロックフィルダムの場合2～5ルジオン程度とすることが多い。

奈川渡ダムにおいては、標準パターンのグラウト孔(3m間隔)の中間に試験孔を設け、試験孔のルジオン値と両側の標準パターンのグラウト孔のルジオン値およびセメント注入量の間の関係を求めて追加グラウティングを行なわなくとも、所定のルジオン値(1ルジオン)以上の範囲が残る確率が5%以下となるようにつぎの追加基準を決定し、これにより必要ある箇所追加グラウティングを行なっている。

- 1) 相隣るグラウト孔がともにステージごとの単位セメント注入量が100kg/m³以上の場合
- 2) 所定深度以内でルジオン値が5以上の場合
- 3) その他必要と認められた場合

この結果、チェック孔によるルジオンテストの結果、所定の1ルジオンを超えるステージ数を全体の4%程度とすることができた。