

ダム基礎岩盤における地圧測定と合理的な グラウチング注入圧力選定法

柴田 功*

ダム基礎岩盤グラウチングにおいて、セメント注入量は注入圧力の影響を強く受ける。高い注入圧力を採用すれば注入量は急増するが、高すぎる圧力は有害な浮揚をひき起こすので、合理的な注入圧力の決定法が切望されている。この論文は、ハイドロリックフラクチャリングによって測定した地圧と関連させた合理的な注入圧力の決定方法を提案するものである。また、ハイドロリックフラクチャリングによる地圧測定方法について改善した方法とその精度についても報告する。

Keywords : Dam foundation, Grouting, Injection pressure, Hydraulic fracturing, In-situ stress measurement

1. 緒 言

(1) ダム基礎岩盤グラウチングの重要性とその研究方法

ダムの基礎岩盤は、風化、クリープ等の影響を受けて、表層に近くなる程ゆるんでいる。そのため、地表のゆるみの著しい部分は掘削除去して、その下の堅硬な岩盤を基礎にしてダムを築造するが、細かい空隙が残っているのが普通である。しかるに、ダムによってせき上げられた貯水池水による基礎岩盤内の浸透流の圧力のポテンシャルは、ダム底付近で最大となるので、普通はダム底から数十メートルの範囲を対象として、空隙をセメントグラウトで充填し、浸透流を抑制するための基礎岩盤グラウチングが行われている。この基礎岩盤グラウチングは、万一不備があれば、1976年の米国のティートンダムの事故¹⁾のように、近代的なダムであっても決壊して大惨事を招くので、ダムの重要な構成部分として機能しているものである。

ダムの基礎岩盤は、各地点毎に異なる地質学的、地形学的な背景、履歴を持っているのでその様相は多種多様であり、弱点となる割れ目の方向、規模、連続性、間隙夾雑物等に特定の規則性は認められていない。このため、多くの研究者によって岩盤の浸透流ならびにその抑制に関する基礎理論の研究がなされてはいるが、いまだ実際の設計、施工に反映させられるまでには至っていない。

このような状況の中で、ダム基礎岩盤グラウチングについて研究をするには、基礎理論の研究を川上とするならば、それが下流の応用技術より上位にあって、技術開発は基礎理論の研究から始めるべきだとする考え方で取り組むのには無理がある²⁾。すなわち、少数の疑いのない公理から論理的に演繹された体系を求めることは、現状

では困難であり、現場情報をよく分析、研究して、現実的な技術問題を解く努力によって、下流から川上へのフィードバックを図ることが一つの研究手法として有用であると考えられる。

ダム基礎岩盤グラウチングのメカニズムに影響を及ぼす要素は多数あるが、本論文では、それらのうちで最も影響が大きいと考えられている注入圧力³⁾について、上述の観点にたつて研究した結果をとりまとめたものである。

(2) ダム基礎岩盤グラウチングにおける注入圧力の影響

ダム基礎岩盤グラウチングの主な作業は、ボーリングと注入から成るが、硬い岩盤のボーリングの工費が大きな割合を占めるので、注入の到達範囲を拡げられて、グラウト孔間隔を粗くできれば経済的になる。そのため、1ステージ当りの注入量を多くすることが、グラウチングの効率を上げる手法の一つであると考えられている。

任意の注入ステージにおける注入量は、注入ステージ長、グラウトとしてのセメント懸濁液の粒径分布や濃度等にも関係するが、注入圧力を高くすればする程増加するので、注入圧力の影響を最も強く受けることが知られている³⁾。

現在、注入圧力は、担当技術者の知識経験に基づいて決められているが、その考え方には次の二通りの方法がある。

① 注入箇所の上のかぶりの岩盤重量を越えないようにする。これは上載岩盤による鉛直応力 σ_v より低い圧力を用いれば、岩盤を浮揚することはないから安全な注入圧力であるとするもので、米国開拓局によって、岩盤の密度を 2.3 t/m^3 とみなし、 σ_v はこれと上載の深さの積であるとして、次式のような経験則が示されている⁴⁾。

$$p \leq \sigma_v \approx 0.23d \dots\dots\dots (1)$$

ここに、 p : 注入圧力 (kg/cm^2)

* (財) ダム技術センター 理事

(〒106 港区麻布台2-4-5 メソニック 39 森ビル)

表一 A ダムにおける限界圧力とグラウチング注入圧力

竣工年	型式・高さ	地質	工種	注入圧力 (kg/cm ²)	
				限界圧力 (p _c)	注入圧力 (p)
1990	ロックフィル	中生代白亜紀の濃飛流紋岩類及び花崗斑岩 左右岩高標高部は濃飛流紋岩が主体 河床、左右岸低標高部は花崗斑岩が主体 堅硬であるが、亀裂性の高透水岩盤。ルジオン値としては10~20Luの高透水性が残り、特に右岸部に厚く分布している。	ブランクエツトグラウチング	1ステージ 0.5~1.5 2ステージ 1.0~4.5 3ステージ 2.0~5.0 または 4.5~7.0	1.0 3.5 4.0 または 6.0 (p ≒ p _c + 0.5 ~ 1.0)
			カーテンググラウチング	1ステージ 2~3 2ステージ 4 3ステージ 6 4ステージ 7~9 5ステージ以降 8~12	3 5 8 12 15 (p ≒ p _c + 2 ~ 3)

d: 注入箇所地表からの深さ (m)

米国のダム技術の影響を強く受けて発展してきたわが国のダム技術は、1970年頃まではこの考え方を基本としていた。

② 構造物や岩盤に有害な浮揚を生じさせる揚圧力は、注入圧力と作用面積との積で表される。したがって、き裂に入ったグラウトの拡がりを時間当り注入量および全注入量を規制することによって作用面積を制限して、次式のように大きな注入圧力を採用する⁹⁾。

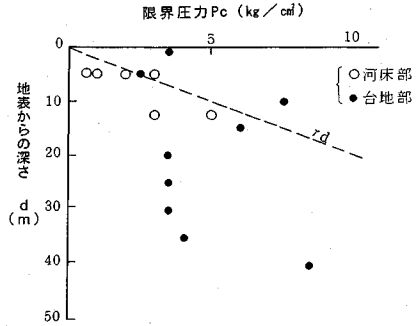
$$p \leq 1.0 \sim 2.0d \dots \dots \dots (2)$$

この考え方は、黒四ダムの工事中にイタリアの技術者の経験によってもたらされたものであり、このように高い注入圧力は、極めて高いアーチダムを築造できるような良好な岩盤に対して勧告されたものであることは理解されていたが、それを可能とするメカニズムについては不明のまま経過してきた。しかし、高圧注入のときグラウトがよく入るので、有害な浮揚を生じない限り高い圧力を採用しようとの試行が繰返され、現在では0.8~1.0dのような高圧を採用する例も多くなってきた。

土木学会のダム基礎岩盤グラウチングの施工指針⁶⁾では、注入効果に最も大きな影響を与える要素が注入圧力であるとし、最高注入圧力は、注入箇所の状況、基礎岩盤の状態などに応じて、ダム本体ならびに岩盤に有害な変形を生じないように定めることとしている。また、建設省のグラウチング技術指針⁷⁾でもほぼ同様で、グラウチングの効果が最大となるように注入圧力を高めることとしている。これらは、多数のダムでの、ダムの規模や基礎岩盤の良否に対応して施工した経験をもととしているが、夫々のダムで、具体的にどのようにして注入圧力を選定すべきかについては述べられていない。

(3) 限界圧力とグラウチングの注入圧力

吉田は、ポーリング孔の透水テストで注入圧力を順次高めてゆくとき、ある圧力までは注入圧力と透水量は比例するが、この圧力を越えると透水量が急激に増加することを見出し、人為的な圧力のための水の通路が破壊されて変化を起こすと思われることを報告したが、それ以上の追求はなされていない⁸⁾。



図一 B ダムのカーテンググラウチングにおける p_c と d の関係

著者は、注入圧力 p と注入速度 (流量と呼ぶことにする) q との関係を図-4 のように図示して、これを p~q 曲線と呼ぶこととし、この曲線が比例関係にある初期の直線から外れて折れ曲がる点の圧力を限界圧力 p_c と定義した。そして、岩盤の透水度は p_c より低い区間の p~q 曲線から求めるべきであることを指摘した^{9),10)}。また、カーテングラウト孔からの注入グラウトの拡がりが相互に干渉し、それ以上狭い間隔での中間孔の施工が不必要となる孔間隔が、大多数のダムで採用されている1.5mとなるような注入圧力を定めるべく調査した。そして、多数のダム基礎岩盤グラウチングの施工記録について、p_c に着目して調査した結果に基づいて、堆積軟岩や破碎による軟弱岩のグラウチングでは、注入圧力を次式のように選定するのがよいと提案した¹⁰⁾。

$$p = p_c + \alpha \dots \dots \dots (3)$$

ここに、α = 1~2 kg/cm²

具体的な注入圧力の決定方法が無かったため、この式が大きな影響を与え、わが国の大多数のダムで、式(3)を基本とした注入圧力の選定が行われるようになっていく。このような方法による最近のグラウチングの施工例としての白亜紀の濃飛流紋岩類の上に建設したAダムの注入圧力は表一に示す¹¹⁾とおりで、開口き裂の多い岩盤であったが、湛水後漏水もなく極めて良好な結果が得られたことが確認された。

しかし、同じダムサイトでも、p_c の値は大きくばら

つのが通例であり、図-1¹²⁾に示したBダムの例のように、注入箇所の上載岩盤重量の数分の一から数倍の開きをもつ値となることが多い。このため、多用される式(3)には、 p_c の決め方について大きなあいまいさが残っている。

多くのダムでの基礎岩盤グラウチングでの経験によって、上述の式(3)に基づいて選定した注入圧力が良好な結果が得られることがわかっているから、著者はダム基礎岩盤グラウチングのメカニズム解明には、 p_c が大きくばらついた値を示す原因の究明が重要な鍵を握るものと考えてきた。また、 p_c は注入される岩盤の物理的状況と、注入されたグラウトの流れに深くかかわるものと考え、前述のように、川下からのアプローチについても努力してきた。

本論文では、これらについて一応の成果を得たので報告するものである。

2. 注入箇所の地圧

(1) 岩盤グラウチングとハイドロリックフラクチャリングによる地圧測定

岩盤へ粘性の低い液体を際限なく注入しようとするならば、少なくともその注入箇所に作用している地圧のうち最小主応力を越す注入圧力をかけてやらなければならない筈である。したがって、岩盤グラウチングでは、その注入のメカニズムは地圧と深くかかわっていると考えられ、この問題を研究するには、地圧を正しく測定することが必要不可欠である。

地盤は地表に近くなるにつれて風化等によってゆるみが生じていて、そこに作用している地圧を測定することは困難だと考えられてきた。しかし、ダム基礎岩盤グラウチングによって改良したいゾーンはまさにそのゆるんだゾーンであって、ダム底から数十メートルの深さまでの比較的浅い箇所において、上述のように困難だとされている地圧の測定をしなければならないことになる。

地圧測定法としては、ボーリング孔のハイドロリックフラクチャリングによって求めるものが、ダム基礎岩盤グラウチングと類似した技術であると考えられるから、ダム工事での汎用機器と、グラウチングの技術を応用すれば割合容易に地圧測定をすることができるのではないかと考えた。しかし、風化、ゆるみ域であるため、この技術で用いる破砕用注入液の封じ込めがむづかしくなるし、作用している地圧の値が小さいから精度よく計測することが困難となるなどの問題があるので、その実施には工夫が必要である。

(2) ハイドロリックフラクチャリングによる従来の地圧測定法

従来のハイドロリックフラクチャリングによる地圧測定は、基本的には、鉛直なボーリングによる円孔井戸の

一部をパッカーで区切ってシールした特定の区間に注入液を一定の流量で圧入して、円孔のまわりの岩に引張破壊を生じさせ、さらにそれが閉じるときも含めての圧力の経時変化を記録し、解析することから成立している¹³⁾。

これまでの多くの研究と経験によって、鉛直ボーリング孔まわりの引張による割裂は鉛直であり、また、最小水平応力に垂直であると考えられている^{14)~16)}。そして、割裂は最初鉛直に発生し、その後地圧の最小主応力が鉛直である場合は、その最小主応力に垂直な水平方向に転じるとされている^{15), 16)}。

注入圧力を上げてゆき、限界圧力 p_c 、すなわち、ボーリング孔の円孔壁の引張破壊強さを越してから、瞬時にコックを閉じて注入液の圧力を封じ込めると、孔内圧力はその箇所に作用する最小水平地圧に相当する平衡圧力 p_s まで急低下し、その後さらに徐々に減衰する。

p_s は注入箇所に作用する最小水平応力 σ_{Hmin} に対抗して割裂を開いたままに保て、かつ延伸させるに要する孔内最小圧力でもあって、これまでの多数の地圧測定の経験から、

$$p_s = \sigma_{Hmin} \dots \dots \dots (4)$$

の関係があると考えられている¹⁷⁾。

実際の岩盤は完全弾性体ではないし、円孔のまわりに応力によって割裂が発生する以前に節理等の割れ目が存在するけれども、多くの経験によって、ハイドロリックフラクチャリングによって発生する割裂は、上述のメカニズムに従うものと考えられている¹⁵⁾。

注入液が岩盤に浸透する場合は、解釈が難しくなる^{18), 19)}。また、注入液の粘度が小さく浸透性のときは孔軸の向きに関係なく堆積面に平行な割裂が低圧でできるが、粘度の大きい不浸透性注入液では、孔軸に沿った鉛直な割裂がかなり高圧でできるとされている^{20), 21)}。

(3) ゆるみゾーンでの地圧測定のための工夫

ところで、上述のように、ダム基礎岩盤で地圧測定をしたいゾーンにはゆるみがあるため、注入液がその空隙に浸透してしまうから、ハイドロリックフラクチャリングによる正確な地圧の測定は困難である。しかし、冒頭で述べたように、下流から川上をみるように発想を変えてみると、既にグラウチングして、空隙をセメントグラウトで充填したゾーンでは注入液の浸透は起こらないから、この方法による地圧測定ができるのではないかと考えてみた。このように既にグラウチングしたゾーンで地圧測定をすれば、充填されたセメントグラウトに、施工時の高い注入圧力の影響が残っていないかという懸念がある。しかし、式(4)の成立の背景で述べたように、注入圧力は σ_{Hmin} に相当する平衡圧力 p_s まで急低下し、その後さらに減衰することがわかっているし、さらに、水セメント比が極めて大きいセメントグラウトが硬化するまでには長時間を要するから、上述の理由に

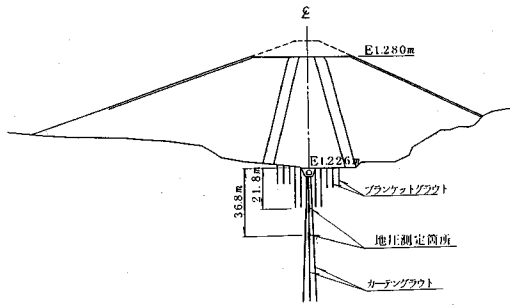


図-2 地圧測定位置とダム横断面図

よって、硬化したセメントグラウトは σ_{Rmin} より高い圧力を保ちえないものと考えられる。また、基礎岩盤グラウチングを施工する前に地圧測定ができなければ、この研究の成果を反映できないという問題もある。この点については、施工前に調査のためのテストグラウチングによって間隙を充填し、注入液が浸透しないようになってから地圧測定することによって解決できるものと考えられる。

本研究では、上述のように考えて、新第三紀中新世の凝灰角礫岩を主とするCダムの河床基礎岩盤でハイドロリックフラクチャリングによる地圧測定について研究をした。Cダムはロックフィルダムであり、カーデンググラウチングはダムが30m以上盛立てられてから始め、施工をほぼ終えてから地圧測定をすることにしたので、地圧測定時には、図-2に示すように、ダムは天端の下8mまでの高さ54mまで盛立てられていた。

(4) 瞬間閉塞時平衡圧力の測定法の改善についての提案

従来のハイドロリックフラクチャリングによる地圧測定法の研究課題は、当初は理論と実際の差異に関するものであったが、多くの経験を重ねるにつれて信頼度が高いことが確かめられ、その精度を上げるべく、瞬間閉塞時平衡圧力 p_s を見出すための測定記録の $p-t$ 曲線の解釈法が現在の最大関心事となっている²²⁾。これは、まったく水を透さないのみなせるような岩に穿孔し、その孔に注入液を圧入して円孔壁にハイドロリックフラクチャリングによる割裂を生じさせ、そこにも注入液を圧入した段階でポンプを止めると、割裂は幾分か延びてその分だけ圧力が下がるかもしれないが、その値は小さく、封入注入液の逃げ場がないため、圧力の減衰に長時間を要するとの考え方に由来するものと思われる。

これまでの多数の深所でのハイドロリックフラクチャリングによる地圧測定に関する研究論文によれば、岩盤には割れ目が多いためその引張強さがないものがある¹⁴⁾ことや、瞬間閉塞後の封入注入液の圧力は、極めて短時間の間に地圧の最小水平応力と平衡することが示されて

いる^{16), 23)}。著者は、このことは数百～数千mの深所でも割れ目があって、孔壁に発生させた割裂に封入した注入液がそれらを通して逸散するためであろうと推察した。そして、いま対象にしているような浅所のハイドロリックフラクチャリングによる地圧測定では、土木工事としては実用上難透水であっても、岩盤に割れ目が多く、かつ幾分か透水性を有するから、孔壁まわりの割裂への封入液の圧力の最小水平地圧 σ_{Rmin} より高い分は、それらの割れ目を伝わって、ほとんど瞬時といえるような短時間に消失する筈である。このことは、現在、大多数の関係科学者、技術者によって行われているような、 p_s を p の経時変化を示す $p-t$ 曲線の減衰途上の値として、曲線の解釈²²⁾によって求めようとする方法では、その結果が不安定になりやすいから、時間以外の要素によって求められないかについて研究すべきであると考えた。

そこで本研究では、ポンプの機構が、その昇圧は流量での増加によってのみ行えることに着目し、実験室での試験とは異なって大規模な現地の注入液封じ込めでは事実上困難な流量 q 一定の注入条件を取り払い、グラウトポンプによって p_c 以上の高い孔内圧力に達し、さらにこれを保つべく注入液を送り込んでいたときの p および q の経時変化のみならず、配管の途中のコックを閉じて瞬時に閉塞直前の流量 $q=q_s$ から $q=0$ として、円孔井戸に封じ込められた注入液の p の減衰の状況をも測定し、電算機に記録するようにした。

このように考えて現地実験を3箇所でも実施したが、それによって得られた圧力 p および流量 q の経時変化を示す $p, q-t$ 曲線の例は、図-3のとおりである。この実験は、これまでに報告されている地圧測定例とは異なり、この図から直接 p_c を求めることは困難である。しかし、これは1.(3)で述べたように、 $p-q$ 曲線が初期の勾配から外れて、 q が p に比例しなくなって急増する点の圧力として求めることができる^{9), 10)}。また、この図によると、封じ込めバルブを閉じて q を零とし、測定区間への圧力の封じ込めを行うと、 p は瞬時にある値だけ低下し、その後徐々に減衰してゆくが、この p の減衰曲線の変曲点が p_s であるとされているが、この方法では $q=q \rightarrow 0$ までの時間経過が極めて短時間なので、 p_s の決定を正確に行うのは困難である。この点についても、残っている要素である q に着目し、注入中に $q=q_s$ から $q=0$ に遮断した時に、 $p-q$ 曲線が $q=0$ を示す p 軸に戻る点は、封入圧力が最初に平衡すべき圧力、すなわち p_s に極めて近い値を示す筈であると考えて、遮断時の状況についての計測値も図示することにした。

上述のように考えて計測した現地実験記録から得られた $p-q$ 曲線の例は図-4のとおりである。

この現地実験は、3箇所について、ハイドロリックフラクチャリングによる割裂を発生させ、一連の測定をし

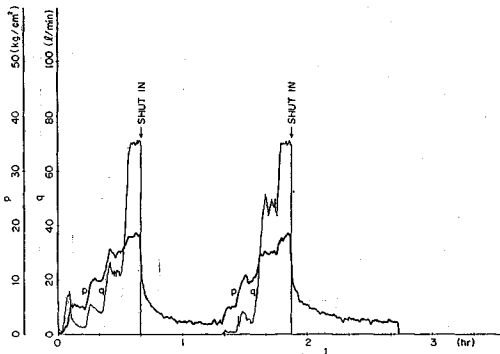


図-3 ハイドロリックフラクチャリングによる現地地圧測定における p と q の経時変化記録の例

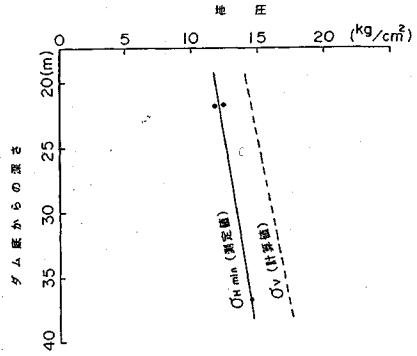


図-5 測定地圧 σ_{Hmin} と計算地圧 σ_v

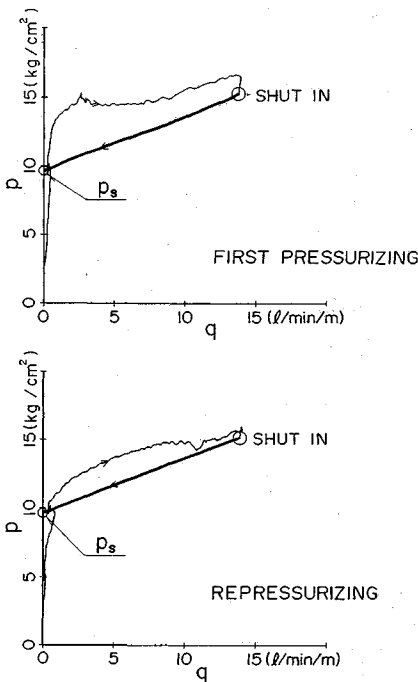


図-4 ハイドロリックフラクチャリングによる現地地圧測定で求められた記録による p ~ q 曲線の例

た後、再加圧による再計測をして、夫々2回の実験をしたが、3箇所とも p ~ q 曲線の2回の計測値は、ほぼ同一の p_s と考えた圧力値に戻って平衡することが示されており、現地実験の結果をみる限り、前述の本実験立案時の推定どおりの結果が得られたことを示している。

(5) 注入箇所の地圧

前項で述べた方法で求めた p_s の測定値によって得られた σ_{Hmin} の測定値は、図-5に示したとおりである。また、FEMにより、盛立中のダムの自重も考慮に入れて求めた鉛直応力 σ_v も同図中に示した。なお、このようにして求めた σ_{Hmin} の精度については、この時点では論じる根拠がないので何とも言えないが、後述するよう

に別途の調査によって、その精度は極めて高ことが判明した。

3. グラウチングの記録と地圧の関係

(1) グラウチングの記録

Cダムでは、地圧測定に先行して、カーテングラウチングが行われた。河床基礎岩盤の地圧測定箇所付近の幅48mの区間のグラウトカーテンについて、施工時に記録された圧力、流量の経時変化を示すチャート进行调查、分析した。

なお、ダムの湛水後、本研究の対象区間およびその周辺からの漏水はまったく生じていない。したがって、満足すべきグラウチングがなされたものと考えられる。

(2) ハイドロリックフラクチャリングの発生

ダム基礎岩盤グラウチングでは、示様注入圧力に達するまで、グラウトポンプでセメントグラウトを送り込み、規定圧力に達してからはその圧力を保ちながら、空隙が大きいときは規定量に達するまで、あるいは空隙が大きくないときはそれがグラウトで充填されて、ほとんど入らなくなるまで注入を続ける。Cダムでの標準的な注入記録チャートの例として、前者に対するものを図-6に、後者に対するものを図-7に示す。

ところで、1.(3)で述べたように、 p_c の値は同じダムサイトでも大きくばらつくことが判っている。したがって、注入仕様で定めた注入圧力より低い p_c の発生が予想されるので、Cダムにおける注入記録チャートを丹念に調査したところ、一部にハイドロリックフラクチャリングを生じたものがあることが判明した。

注入記録チャートにハイドロリックフラクチャリングの発生が示される形態としては、①図-8に示すように、注入圧力 p が一定を保っているとき流量 q が急増するもの、②図-9に示すように、 q が一定を保っているとき p が急低下するもの、③図-10に示すように、グラウチングに先行して実施する水押し試験において、 p が僅か上昇しただけなのに q が急増して、 q が p に比例しなく

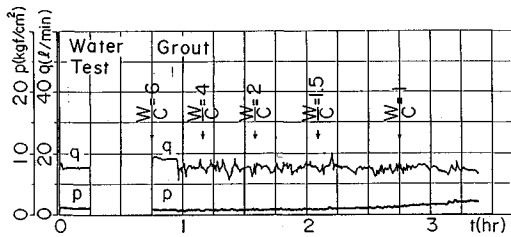


図-6 岩盤中の空隙が大きいときの注入チャートの例

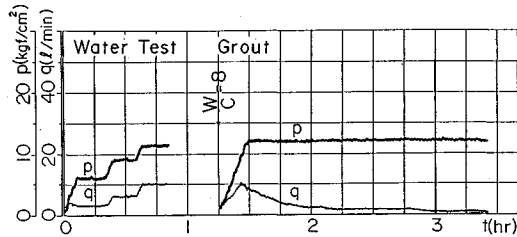


図-7 岩盤中の空隙が小さいときの注入チャートの例

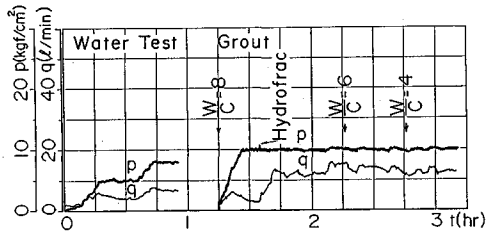


図-8 p が一定のとき q が急増するタイプの hidroリックフラクチャリングの注入チャートの例

なり、その時の p_c より高い p でのグラウティングでは、 p 一定、 q 一定で入るものの3種がある。

(3) グ라우ティングにおける hidroリックフラクチャリング発生圧力と測定地圧との関係

グラウティングにおいて hidroリックフラクチャリングを発生した注入圧力は、1.(3) で述べた限界圧力である。この p_c と図-5 に示した測定地圧との関係をあわせて図示すると図-11 のようになる。この図によると、フラクチャリングを発生したもののうち約 30% が、測定した σ_{Hmin} より低い p_c で生じている。この事実は次のことを暗示しているものと考えられる。

このカーテングラウティングを施工した区間は無処理の段階では $20Lu$ 以上の高い透水性を示していた。このようなゆるみ性岩盤では、ボーリング孔から近い距離内に開口き裂があって、グラウトが孔壁から既存の狭い割れ目を通してその開口き裂に流れるような場合は、グラウト孔のごく近傍の間隙圧が高くなって地圧の有効応力が低下する。あるいは全体としては良好な岩盤が地圧を支えていてゆるみゾーンでの地圧が σ_{Hmin} より低いことがあるかもしれない。したがって、 σ_{Hmin} より低い圧力で

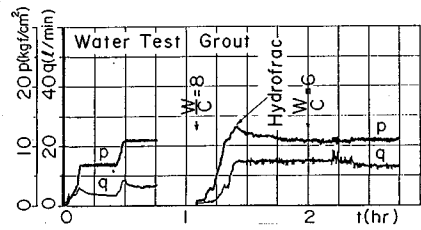


図-9 q が一定のとき p が急低下するタイプの hidroリックフラクチャリングの注入チャートの例

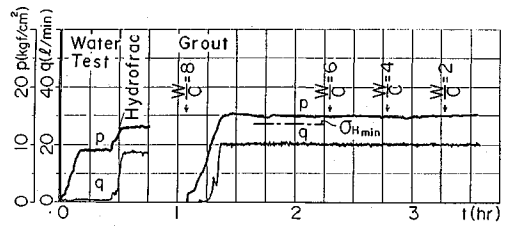


図-10 グ라우ティング前の水押し試験で hidroリックフラクチャリングを起しそれより高い p でグラウティングする注入チャートの例 ($p > \sigma_{Hmin}$)

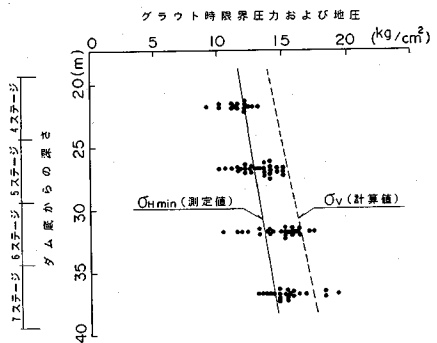


図-11 グ라우ティング時に hidroリックフラクチャリングを起したステージの p_c と測定地圧 σ_{Hmin} との関係

フラクチャリングが生じる場合がある。また、岩盤が多少の引張強さを持っていれば、グラウティング時に hidroリックフラクチャリングを起こさないステージが多くなる。フラクチャリングを起こしたものでその分だけ σ_{Hmin} より高い p_c を示している筈である。

そこで、グラウトカーテンは、中央内挿法に従って施工されているから、 p_c と σ_{Hmin} の関係を、孔間隔 2.5 m 以上の 3 次孔までについては図-12 に、孔間隔 1.5 m 以下の 5 次孔までについては図-13 に分けて図示することにした。図-12 に示した孔間隔 2.5 m 以上のグラウト孔からのグラウティングでは、約 40% のステージで p_c が σ_{Hmin} より低いのが認められるが、それより狭い孔間隔での関係を示した図-13 では、 p_c は σ_{Hmin} より高くなっている。

また、 σ_{Hmin} より高い圧力で hidroリックフラクチャリングを起したステージ数の hidroリックフラ

表一2 σ_{Hmin} より高い圧力でハイドロリックフラクチャリングを起こしたステージ数のハイドロリックフラクチャリングした全ステージ数に対する割合

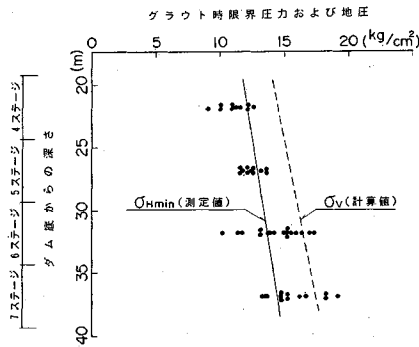
次数	孔間隔	4ステージ	5ステージ	6ステージ	7ステージ	小計
パイロット孔	16.0 m	2/2	1/3	1/2	2/3	6/10 (60%)
1次孔	8.0 m	0/2	2/3	1/2	1/4	4/11 (36%)
2次孔	4.0 m	0/2	1/3	6/7	4/4	11/16 (69%)
3次孔	2.5 m	1/5	1/4	4/6	4/4	10/19 (53%)
4次孔	1.5 m	3/3	9/10	3/3	6/6	21/22 (95%)
5次孔	1.25 m	1/1	5/5	4/4	3/4	13/14 (93%)
小計		7/15 (47%)	19/28 (68%)	19/24 (79%)	20/25 (80%)	65/92 (71%)

註: σ_{Hmin} より高い圧力でハイドロリックフラクチャリングしたステージ数 / ハイドロリックフラクチャリングした全ステージ数
 ()内は、 σ_{Hmin} より高い圧力でハイドロリックフラクチャリングしたステージ数の割合の百分率

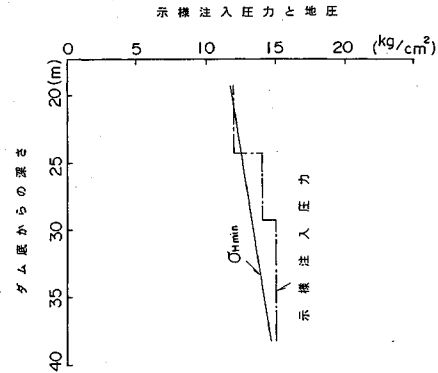
表一3 ハイドロリックフラクチャリングを起こしたステージ数のグラウトしたステージ数に対する割合

次数	孔間隔	4ステージ	5ステージ	6ステージ	7ステージ	小計
パイロット孔	16.0 m	2/5	3/5	2/5	3/5	10/20 (50%)
1次孔	8.0 m	2/5	3/5	2/5	4/5	11/20 (55%)
2次孔	4.0 m	2/10	3/10	7/10	4/10	16/40 (40%)
3次孔	2.5 m	5/17	4/17	6/17	4/17	19/68 (28%)
4次孔	1.5 m	3/31	10/31	3/31	6/31	22/124 (18%)
5次孔	1.25 m	1/31	5/31	4/31	4/31	14/124 (11%)
小計		15/99 (15%)	28/99 (28%)	24/99 (24%)	25/99 (25%)	92/396 (23%)

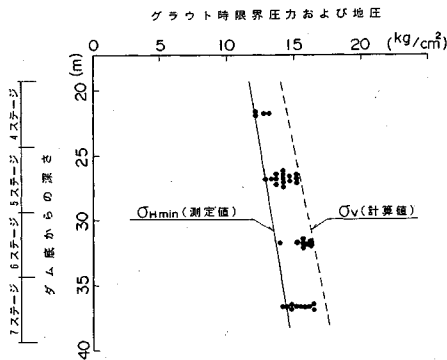
註: ハイドロリックフラクチャリングした / グラウトしたステージ数 / ステージ数
 ()内は、ハイドロリックフラクチャリングしたステージ数の割合の百分率



図一12 孔間隔 2.5 m 以上のグラウチングにおいてハイドロリックフラクチャリングを起したステージの p_c と測定地圧 σ_{Hmin} との関係



図一14 仕様注入圧力と測定地圧 σ_{Hmin} との関係



図一13 孔間隔 1.5 m 以下のグラウチングにおいてハイドロリックフラクチャリングを起したステージの p_c と測定地圧 σ_{Hmin} との関係

クチャリングを起こした全ステージ数に対する割合を表一2に示した。この表によれば孔間隔が2.5 m より狭い4次孔および5次孔では、 p_c が σ_{Hmin} より低いステージは夫々1ステージだけであり、しかもその値は、図一13にみられるように σ_{Hmin} に極めて近いものである。

このように、4次孔および5次孔のように、先行グラウチングによって開口き裂がほとんど充填されて、注入グラウトが浸透しなくなった段階では、推論したとおり、

σ_{Hmin} 以上の p でハイドロリックフラクチャリングが発生していると考えられることが確かめられた。

(4) ハイドロリックフラクチャリングの発生率

深度に応じた各ステージにおける注入回数毎の、注入ステージ数とハイドロリックフラクチャリング発生ステージ数との関係は、表一3に示すとおりである。この表によると、フラクチャリングは全体の23%のステージで発生したが、初期の注入で多く発生していることが認められる。また、浅い第4ステージで発生が少ないのは、工事中に修正しながら定めた最終の仕様注入圧力が、図一14に示したように、 σ_{Hmin} より低かったためであると考えられる。

77%のステージでフラクチャリングが発生しないのは、き裂性の岩盤であっても、き裂が少なく1本1本のき裂の平均長さが短いか、または岩盤が熱水変質を受けているため各き裂が緑泥石等によって充填されているため、かなり大きい引張強度を持っていたので、 p_c が注入の規定圧力より高かったためだと考えられる。

(5) 浅所地圧測定値の精度

上述の研究結果が正しければ、岩盤グラウチングに際してハイドロリックフラクチャリングを発生させた後、 p が σ_{Hmin} より高ければ、ハイドロリックフラクチャリングによって発生した割裂はそのまま延伸してグラウト

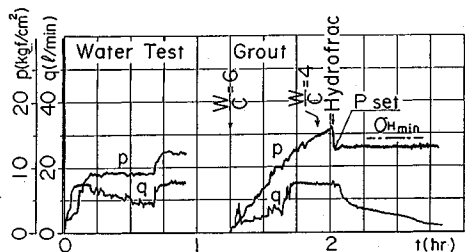


図-15 グ라우チングの途中で p を σ_{Hmin} より低くセットした注入チャート

の注入量は経時的に増加するし、反対に、 p を σ_{Hmin} より低くすれば逆に割裂が閉じてグラウトが入らなくなる筈である。

このことを検証するため、ハイドロリックフラクチャリングを起した後次ステージについて、 p を σ_{Hmin} 以上、あるいは σ_{Hmin} 以下の値にリセットしてみた。その注入記録は、前者については図-10、後者については図-15 に示したとおりである。前者についての図-10 では、 $\sigma_{Hmin}=13.5 \text{ kg/cm}^2$ であるのに対して、これより高い $p=15 \text{ kg/cm}^2$ で注入を続けたところ、流量 q は 20 l/min のまま入り続け、経時的に減少する傾向を全く示していない。しかし、後者についての図-15 では、 $q=15 \text{ l/min}$ の一定値で注入を続けたところ、 $p_c=16 \text{ kg/cm}^2$ でハイドロリックフラクチャリングを起こした後、 $\sigma_{Hmin}=14.3 \text{ kg/cm}^2$ であるのに対して、 $p=13 \text{ kg/cm}^2$ に下げてこれを保持するように規制しながら注入を続けたところ、約2分間は $q=14 \text{ l/min}$ であったが、その後グラウトが入らなくなって、 q は経時的に減少することが示されている。これらによると、上述の関係が存在することは明らかであり、上述の研究結果が正しいことを示している。

このことは、2. で述べたようなゆるみ性岩盤であるための工夫をし、さらに p_s 計測のための新しい試みをして実験した浅所地圧の測定値は、その精度が極めて高く、またその測定法が適切であることを示していると考えられる。

4. 合理的な注入圧力の選定

ダム基礎岩盤の透水としては、岩石自体の透水と、断層、シーム、節理等の割れ目の透水があるが、岩石自体の透水が問題となることはほとんどない。したがって、ここで問題になるのは割れ目の透水であるが、これには、地質的な弱面に沿うゆるみ等による大小の開口き裂を通る流れと、断層破砕帯を埋める夾雑物や節理等に挟まる粘土鉱物等の中を通る流れがある。これに対して、ダム基礎岩盤グラウチングは、高い水頭差に恒久的に耐えるようにするためその主材料はセメントとしているので粒

径がやや大きく、微細な隙間に浸透させるような注入は事実上困難であるから、ある程度の幅を持った開口き裂を充填するとか、断層粘土に割裂をつくって脈状に注入するという形態をとって、岩盤内割れ目のよくない部分をセメントグラウトで埋めてしまい、基礎内の過大な浸透流の抑制を図ろうとするダム基礎工法であると考えられる。

このように考えると、グラウト孔の近くの岩盤に開口き裂があってグラウト孔が貫通していないとき、グラウト孔からハイドロリックフラクチャリングによる割裂が延伸して、その開口き裂に交差する機会がふえそれにグラウトを流して充填できれば注入の効率が向上することは明らかである。そのためには、グラウチングの注入圧力は、ハイドロリックフラクチャリングを起こさせる値を選定する必要がある。しかし、ダムサイトの岩盤は一樣ではないのが通例であり、良好な部分もある。グラウチングによって改良したいのは、き裂の多いゆるんだ部分であって、良好な岩盤に無理をして大きな注入圧力をかけてハイドロリックフラクチャリングを生じさせることは、害のあって益のないことは明らかである。したがって、き裂の多い岩盤でハイドロリックフラクチャリングを起こさせるためには、 σ_{Hmin} 以上の注入圧力を選定したいということは判ったのだが、それをどの位越す値を選定すればより合理的となるかについて考えなければならない。この問題を理論的に演繹して解くことは現状では困難であるから、既に述べたように、現場情報をよく分析、研究して、下流から川上へのフィードバックを図ることを考えてみよう。

Cダムのカーテングラウチングでは、ダム基礎岩盤としては難しいもので、比較的細片化し、風化を受けた部分の多い岩盤であるにもかかわらず、図-14 に示した仕様注入圧力を採用してカーテングラウチングの施工をした。その結果は、湛水後基礎を通る漏水は認められず、良好な遮水機能を果すグラウトカーテンを形成できていることが実証されている。

図-14 に示した仕様注入圧力は、著者らが効率のよい注入をすべく試行錯誤を重ねて選定したものであるが、 σ_{Hmin} はグラウチングをほぼ終えた段階で測定したので、選定時には未知のものであった。しかし、測定した σ_{Hmin} と重ねてみると、5~7 ステージでは σ_{Hmin} より $0.5\sim 1.5 \text{ kg/cm}^2$ 高い値を選定したことになる。このとき、細片化した岩盤であるにもかかわらず、前述したように岩盤の引張強度の影響を受けていて、 σ_{Hmin} より高い注入圧力を採用しても、表-3 にみられるように、すべてのステージでハイドロリックフラクチャリングを起こしたわけではなく、約 $1/4$ のステージに限られている。ハイドロリックフラクチャリングを起こしたステージと起こさなかったステージについて、ボーリング孔単位長

表-4 ハイドロリックフラクチャリングを起こしたステージと起さなかったステージの単位長さ当りセメント注入量の平均

次 数	4 ステージ	5 ステージ	6 ステージ	7 ステージ
パイロット孔 ～3次孔 (孔間隔 2.5m以上)	82.0 / 34.5	87.8 / 39.0	90.7 / 51.5	123.4 / 57.0
4次孔～5次孔 (孔間隔 1.5m以下)	110.4 / 23.2	82.7 / 20.7	34.3 / 25.2	69.7 / 27.1

注: ハイドロリックフラクチャリングを起こしたステージの値 (kg/m) / ハイドロリックフラクチャリングを起こさなかったステージの値 (kg/m)

表-5 ハイドロリックフラクチャリングを起こしたステージと起さなかったステージの所要注入時間

次 数	4 ステージ	5 ステージ	6 ステージ	7 ステージ
パイロット孔 ～3次孔 (孔間隔 2.5m以上)	4:14 / 3:41	3:29 / 3:43	4:25 / 3:38	4:50 / 3:45
4次孔～5次孔 (孔間隔 1.5m以下)	5:27 / 4:10	4:32 / 5:05	3:51 / 4:27	5:46 / 4:24

注: ハイドロリックフラクチャリングを起こしたステージの値 (時:分) / ハイドロリックフラクチャリングを起こさなかったステージの値 (時:分)

さ当りのセメント注入量の平均を表-4に、また所要注入時間の平均を表-5に示すが、これらによると、ハイドロリックフラクチャリングを起こしたステージでは、起さなかったものより数倍のセメントが注入されたが、所要の注入時間はさほど長くなっていないことが判る。

3.(3)で述べたように、ハイドロリックフラクチャリングを起こしたのは、その周辺の岩盤の引張強度があまり大きくない部分だけだと考えられるから、Cダムでは、岩盤のあまりよくない部分のき裂系に対して他の良い部分よりも多くのセメント注入をあまり不経済にならない注入時間で施工できるような適切な注入圧力を選定し得たと考えることができる。

以上のように、本研究の成果によれば、ダム基礎岩盤グラウチングにおける注入圧力は、注入箇所作用する σ_{Hmin} を、グラウチング用汎用機器を用いたハイドロリックフラクチャリング法によって測定し、次式のように選定するのが合理的だと考えられる。

$$p = \sigma_{Hmin} + K \dots \dots \dots (6)$$

ここに、 p :合理的な注入圧力、 K :定数
 K の値は、岩盤の良否、すなわちゆるみ状況、割れ目の平均長さ、割れ目内充填物の状況などによって定まる岩盤の引張強度に対応して変わるべきものであるが、Cダムや、多くのダムにおけるグラウチングの経験から、軟弱岩盤では1~2 kg/cm²、良好岩盤では、引張強度が大きくて割裂はでき難いし、その欠陥部に注入するためやや高圧にしたいから3~5 kg/cm²が適当なものと考えられる。

なお、このようにして定めた p が、注入箇所の上載岩盤自重およびダム等の構造物の重量による鉛直応力を越えているときはハイドロリックフラクチャリングによる割裂が水平に転じて、岩盤および構造物の浮揚が生じることも考えられる。このような浮揚を生じさせる揚圧力は、注入圧力と作用面積との積で表される。注入圧力は、上述のようにして選定するのが合理的であるから、き裂に入ったグラウトの拡がりを見全注入量を規制することによって作用面積を制限して揚圧力が大きくならないようにコントロールし、浮揚を防止する必要がある。

5. む す び

(1) ダム基礎岩盤グラウチングにおける注入圧力は、注入箇所の地圧と深くかかわっている。そして、グラウト孔の近くに開口き裂があってグラウト孔がこれを貫通していないとき、グラウト孔壁からハイドロリックフラクチャリングによる割裂が延伸してその開口き裂に交差する機会を増やして、それにグラウトを流して充填できれば、注入の効率が向上することは明らかである。そのためには、最小水平地圧 σ_{Hmin} よりいく分高い圧力を採用する必要がある。したがって、注入圧力は、次式のように選定するのが合理的である。

$$p = \sigma_{Hmin} + K$$

ここに、 p :合理的な注入圧力、 K :定数
 K の値は、岩盤の引張強度すなわち岩盤の良否に対応して変わるべきものであるが、軟弱岩盤で1~2 kg/cm²、良好岩盤で3~5 kg/cm²が適当なものと考えられる。

(2) このようにして定めた p が注入箇所の上載岩盤自重およびダム等の構造物の重量による鉛直応力を越えているときは、ハイドロリックフラクチャリングによる割裂が水平に転じて、岩盤および構造物の浮揚が生じることを防止するため、き裂内のグラウトの作用面積を制限すべく全注入量を規制する必要がある。

(3) ゆるみ域である浅所の地圧測定には、相当の工夫を必要とする。すなわち、 σ_{Hmin} は、グラウチング用汎用機器を用い、従来のハイドロリックフラクチャリング法を本研究で提案したように、 p_s は、 $p-q$ 曲線が瞬間閉塞後 $q=0$ に戻った瞬間の圧力であるとして求めることによって、比較的容易に、精度よく測定できる。地圧測定孔のまわりにゆるみや開口き裂があるときは、地圧測定に先行して、これをセメントグラウトで充填しておけば良好な結果が得られる。

(4) 上述の考え方に沿うと考えられる注入圧力を採用してカーテングラウチングの施工したCダムの例によると、湛水後基礎を通る漏水は認められず、良好な遮水機能をもつグラウトカーテンを形成できることが実証された。したがって、本研究に基づいて選定した注入圧力は適切であることが判明した。

本研究のための現地実験に際しては、試行錯誤を繰返

したので、多数の方達の御協力、御助言をいただきました。深甚の謝意を表します。

参 考 文 献

- 1) Independent Panel to Review Cause of Teton Dam Failure, Report to U.S. Department of Interior and State of Idaho on Failure of Teton Dam, 1976.
- 2) 青木昌彦：日本の科学技術—革新力見劣りせず，日本経済新聞，1988. 4. 28.
- 3) 土木学会：岩盤力学，p. 338, 1966.
- 4) Minear, V.L. and General: Aspect of Cement Grouting of Rock, Proc. A.S.C.E. 1145, 1957.
- 5) 土木学会工事報告，黒部川第四発電所，1966.
- 6) 土木学会：ダム基礎岩盤グラウチングの施工指針，1972.
- 7) 建設省河川局開発課監修：グラウチング技術指針，同解説，1973.
- 8) 吉田勝英：ダム基礎グラウト施工基準の定め方に関する一提案，土木学会論文集，No. 77, 1961.
- 9) 柴田 功：ダム基礎岩盤のグラウチング，日本大ダム会議第5回技術講演討論会，1973.
- 10) 柴田 功：軟岩のグラウチング，建設省土木研究所資料，No. 828, 1973.
- 11) 阿部利雄：阿木川ダムの基礎処理について，ダム日本，No. 513, 1987. 7.
- 12) 柴田 功：軟岩の透水性と止水設計法に関する研究，建設省土木研究所報告，153号の1，1980. 3.
- 13) Scheidegger, A.E.: Stresses in the earth's crust as determined from hydraulic fracturing Data, Geol. und Bauwesen, 27 (2), 1962.
- 14) Hubbert, M.K. and Willis, D.G.: Mechanics of hydraulic fracturing, Trans. AIME 210, 153-166, 1957.
- 15) Haimson, B.C.: The Hydrofracturing stress measuring technique-method and recent field results in U.S., Proc. Int. Soc. for Rock Mechanics, Symp. on Investigation of Stress in Rock, Sydney, Australia, 1976.
- 16) Zoback, M.D., Healy, J.H. and Roller, J.C.: Preliminary stress measurements in central California using the hydraulic fracturing technique, Pageoph. Vol.115, 1977, Birkhauser, Verlag, Basel.
- 17) A. McGarr and N.C. Gay: State of stress in the earth's crust, Ann. Rev. Earth Planet. Sci. 6, 1978.
- 18) Schmitt, D.R. and Zoback, M.D.: Poroelastic effects in the determination of the maximum horizontal principal stress in hydraulic fracturing tests- a proposed breakdown equation employing a modified effective stress relation for tensile failure, Int. J. Rock Mech. and Geomech. Abstracts Vol.26, No.6, 1989.
- 19) Detournay, E., Cheng, A.H.-D., Roegiers, J.-C. and McLennan, J.D.: Poroelasticity considerations in situ stress determination by hydraulic fracturing, Int. J. Rock Mech. and Geomech. Abstracts Vol.26, No.6, 1989.
- 20) Scott, P.P., Jr. Bearden, William, G. and Howard, G.C.: Rock rupture as affected by fluid properties, Trans. AIME 198-11, 1953.
- 21) Reynolds, J.J., Bocquest, P.E., and Clark, R.C., Jr.: A Method of creating vertical hydraulic fractures, Drill, and Prod. Prac. 206, 1954.
- 22) Haimson, B.C.: Foreword and introductions part 1 (Advances in test record interpretation), Int. J. Rock Mech. and Geomech. Abstracts Vol.26, No.6, 1989.
- 23) 塚原弘昭・池田隆司・佐竹 洋・大竹政和・高橋 宏：水圧破壊法による地殻応力の測定，国立防災科学技術センター研究速報，第30号，1978.

(1990. 12. 21 受付)

THE DETERMINATION OF A RATIONAL INJECTION PRESSURE RELATED TO IN-SITU STRESS IN DAM FOUNDATION GROUTING

Isao SHIBATA

It is well known that cement absorption in dam foundation grouting is strongly influenced by injection pressure. The higher injection pressure results in the larger grout take. But if a higher pressure than a reasonable one is applied, a harmful heave or uplift will occur. Therefore, it is prerequisite to determine a rational injection pressure. The major purpose of this paper is to propose a guiding principle of rational determination of injection pressure in dam foundation grouting, which is related to in-situ stress measured by hydraulic fracturing technique. Hence, a hydraulic fracturing procedure newly-devised by the author for in-situ stress measurement at shallow depth is also introduced.