

(21) ダムの止水グラウティングに関する一考察

水資源開発公団	正会員	○ 播田一雄
水資源開発公団	正会員	田淵 弘
山口大学大学院	学生会員	浅津直樹
山口大学工学部	正会員	古川浩平
山口大学工学部	正会員	中川浩二

A Consideration of Curtain Grouting on a Dam

Kazuo HARITA, Water Resources Development Public Corporation
Hiroshi TABUCHI, Water Resources Development Public Corporation
Naoki ASAZU, Yamaguchi University
Kohei FURUKAWA, Yamaguchi University
Koji NAKAGAWA, Yamaguchi University

Abstract

It is a difficult problem to estimate the effects of grouting on the foundation rock of a dam, because it can not be recognize in advance. Therefore, the method of grouting solely depends on the experience of the engineer as matters now stand. However, it is expected that the dam will be constructed on a hard geologic foundation.

This study, using the data of curtain grouting on a dam site, aims to clarify the property of permeability of the foundation rock, and the process of improvement of Lugeon value by statistical analysis, and gives some useful data for optimum design and control of foundation grouting for the future.

1. 緒言

ダム基礎岩盤の止水改良を目的とするグラウティングにおいて、対象とする地盤の状況を完全に把握することは困難である。従って、その施工法の良否及び効果の判断は非常に難しいと考えられる。そのため、この施工は現在でも、一般に経験的な手法による部分が多く残されている。しかも、日本は欧米に比べて比較にならないほど複雑な地質環境を有しており、その厳しい地質環境下でダムを安全かつ経済的に建設していくためには、グラウティングの合理的な設計、施工が一つの重要な要素となる。このような観点から、本研究ではHダムのカーテングラウティングを対象として、岩盤の透水特性を主として統計的な解析により明らかにし、将来の最適なグラウティング設計及び施工に有益なデータを提供しようとするものである。

2. Hダムの概要

Hダムは堤高75m、堤頂長288m、堤体積44万 m^3 の多目的直線重力式コンクリートダムである。ダムサイトの基礎地盤は、古生層の砂岩、粘板岩及び砂岩・粘板岩の互層からなっており、ところどころにひん岩の貫入が見られる。断層は特に大規模なものはないが、右岸にF1断層（破碎幅0.5m）、河床にF2'断層（破碎幅1.0～1.5m）、F2'派生断層（破碎幅0.5～1.5m）、左岸にF4断層（破碎幅0.5～2.0m）等が存在する。また、河床部には上流25～35°で傾斜する低角度節理群が認められる。高標高部には、風化の進んでいるとみられる基礎地盤がかなり深くまで存在する。

カーテングラウティングの施工方法には中間内挿法を用いており、孔間隔は1.5m 1列を基本とし、透水層等で不十分な場合は追加孔として4次孔を実施している。グラウトの最大注入圧力の最高値は、当初15 kg/cm^2 であった。しかし、リムグラウティングの施工結果から、孔間隔1.5mでは改良目標値への到達が懸念されることが判ったため、注入圧力の最高値は30 kg/cm^2 に変更されている。

3. 岩盤の止水改良状況

図-1,2に各次孔毎のルジオン値及び単位注入量の超過確率図を示す。両図を比較すれば、図-2の単位注入量は次数を重ねる毎に全体的に減少しているのに対し、図-1では高ルジオン部分の改良は確実に進んでいるが、低ルジオン部分の改良はそれに比べて低く、特に約0.7Lu以下ではわずかではあるが、透水性の増大が起こっていることがわかる。この結果より、セメントミルクは透水性の低い部分よりも高い部分に選択的に注入される傾向があると判断できよう。また、図-1, 2は対数正規確率紙を用いているが、どの場合でも概ね直線性を示している。よって、ルジオン値と単位注入量の分布として対数分布を考えることはほぼ妥当であると考えられる。

次に、図-3(a),(b)にパイロット孔と3次孔のルジオン値の推移を、ステージ毎に高さ方向に描いた図を示す。パイロット孔のルジオン値は、全く止水処理を行っていない自然状態の透水性を表している。図の中央部は河床部であり、ひん岩の貫入運動に伴う周縁岩盤の亀裂に加え、上下流方向に走行する断層破砕帯の影響により、中央付近に高透水性ゾーンを形成している。また、リム部に相当する図の左右部でも、断層破砕帯と岩盤の深層風化に伴う高透水性ゾーンが広範囲にわたって見られる。図-3(b)は3度のグラウチングを行っ

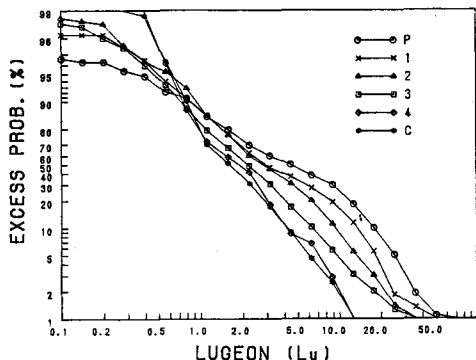


図-1 ルジオン値の超過確率

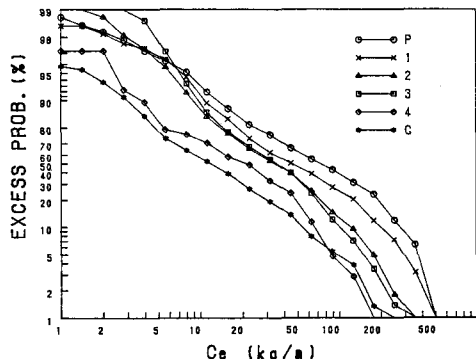
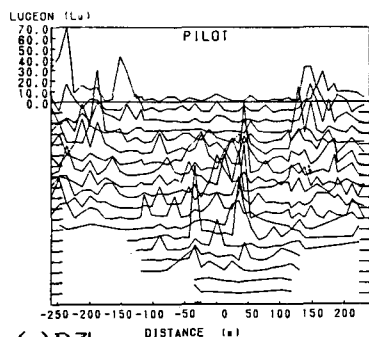
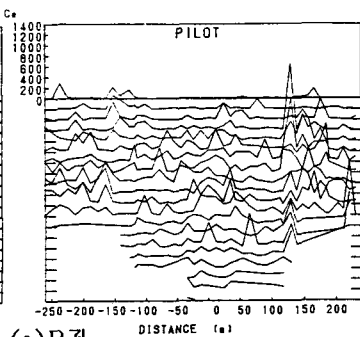


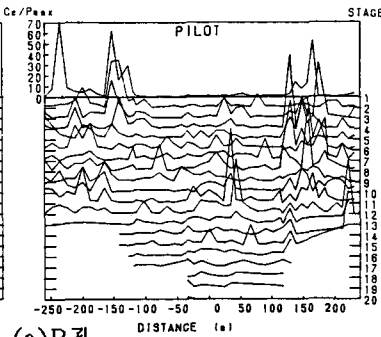
図-2 単位注入量の超過確率



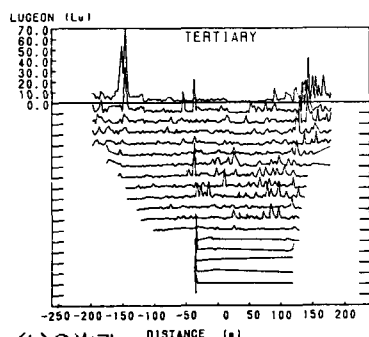
(a)P孔



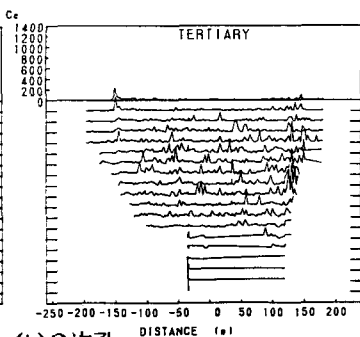
(a)P孔



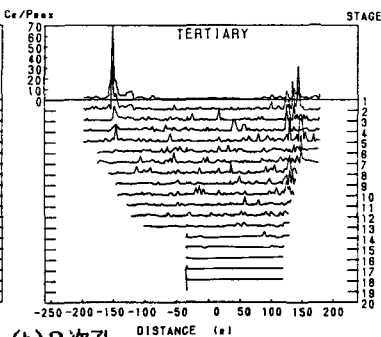
(a)P孔



(b)3次孔



(b)3次孔



(b)3次孔

図-3 ルジオン値の推移

図-4 単位注入量の推移

図-5 注入度の推移

た後の3次孔のルジオン値である。パイロット孔のルジオン値と比較すれば、全体的にかなり小さくなっており、岩盤の止水性の改良は順調に行われていることがわかる。しかし、左右のリム部には依然として高透水性ゾーンが残されており、後に追加孔が実施されている。リム部の改良が遅れた原因は、前節で述べたようにグラウトの最大圧力が低く、セメントミルクが十分に充填できなかったことにあると思われる。これに対し、本体部では一部を除いてほぼ改良目標値に近づいており、孔間隔に対して適切なグラウト圧であったといえる。

また、図-4(a),(b)には、パイロット孔と3次孔の単位注入量を示す。この図でもパイロット孔と3次孔を比較すれば明らかに単位注入量は減少しており、施工回数毎の改良効果の判定はできる。しかしながら図-3(a)で表れていた高透水性ゾーンにおいて、この図の注入量は大きくなっていない。そこで、単位注入量 C_e をグラウト最大圧力 P_{max} で除した注入度 C_e/P_{max} を用いて、図-3,4同様に描いたのが図-5(a),(b)である。この図によれば、リム部の高透水性ゾーンが明確に表現できていることがわかる。図-3(a),(b)と図-5(a),(b)のそれぞれを比較すれば双方とも類似したグラフとなっており、改良効果の判定にはルジオン値のみならず、注入度 C_e/P_{max} を用いることが妥当と考えられる。

4. 透水量と注入量の相関性

実際のグラウチングを行う際には、ルジオン値から概略の単位セメント注入量を推定することが重要となってくる。これまで多くの研究の中でこの問題が取り上げられているが、その結果はケースバイケースで異なっている^{1), 2), 3)}。本研究の場合の、パイロット孔におけるルジオン値と単位注入量の相関図を図-6に示すが、相関係数は $r=0.38$ であり、はっきりとした相関性は認められない。そこで、前節で用いた注入度 C_e/P_{max} とルジオン値の相関係数を求めたところ、 $r=0.46$ で図-6より相関係数が大きくなり、前節で述べたルジオン値と注入度のグラフが類似した形状になったことを裏付けているが、相関性が大きいとは言えない。

ルジオン値を求める場合にはP-Q曲線が用いられるが、このP-Q曲線の形状は、岩質や地盤性状を反映していると考えられる。当ダムで得られたP-Q曲線のパターンは、大きく分けると次の3つになる。1)透水量と圧力がほぼ比例関係にあり岩盤が弾性限度内にあるもの。2)亀裂の開口により、圧力の上昇中に限界圧力が生じて透水性が急激に増大するもの。3)亀裂の閉塞により、圧力の増加に対して透水量が上がらないもの。

当ダムの場合、頻度的には1)と2)が圧倒的に多く、両方で70%以上を占めている。それぞれの場合のルジオン値と注入度の相関図を図-7(a),(b)に示す。この両図から明らかなように、1)では相関係数は比較的大きいが、2)ではほとんど相関性が認められず、これが全体の相

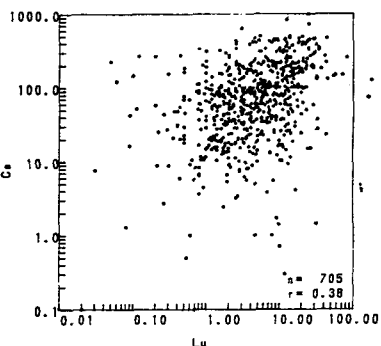
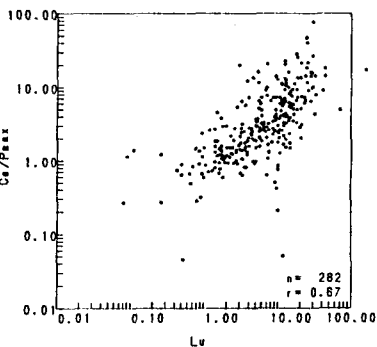
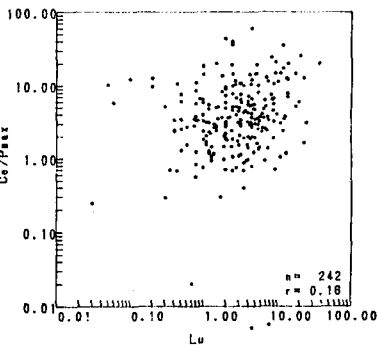


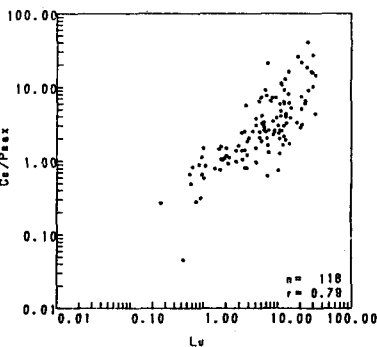
図-6 ルジオン値と単位注入量の関係



(a)パターン1)



(b)パターン2)



(c)パターン1)で原点を通るもの
図-7 P-Q曲線パターン別の相関関係

関性を小さくしている素因となっている。また、図-7(c)には1)の中でも特にPQ曲線が原点を通過するもののみを示したが、相関係数は $r=0.79$ と更に大きくなった。以上の結果から、岩盤が比較的丈夫で弾性体とみなすことができる場合には、ルジオン値から注入量への推定は可能性があるが、限界圧を生じるような若い岩盤では、この推定は非常に困難であることが理解できる。

5. 最適グラウチング設計及び施工に関する検討

i次孔のグラウチングによるi+1次孔位置での止水改良効果の判定を行うため、i次孔注入前のi+1次孔位置での推定ルジオン値 Lu'_{i+1} を次式により求めた。

$$Lu'_{i+1} = (Lu_{i,L} + Lu_{i,R})/2 \quad (1)$$

ここで、 $Lu_{i,L}$ 及び $Lu_{i,R}$ はi+1次孔の両わきのi次孔のルジオン値である。

注入前推定ルジオン値 Lu' と、i次孔のグラウチングを行った後、i+1次孔での水押しから得られた注入後ルジオン値 Lu を両対数紙上にプロットしたものを図-8(a)に示す。この図は $i=1$ の場合である。グラウチングによる止水改良効果があれば、 Lu は Lu' よりも小さくなるため、各点は図の対角線よりも下側に位置するはずである。図を見ればややその傾向が認められるが、 Lu の方が Lu' よりも大きく、対角線よりも上側に位置しているものも少なくない。これはグラウチングによる改悪と考えるよりもむしろ、 Lu' の推定が最小に行われた場所であると考えの方が妥当と思われる。更に図-8(b),(c)では、最大圧力が 13kg/cm^2 以下の低圧である場合と、 30kg/cm^2 以上の高圧である場合を示す。ここで用いる最大圧力はi+1次孔の両わきのi次孔の注入圧力を平均して、次式で求めている。

$$P_{\max}' = (P_{\max,L} + P_{\max,R})/2 \quad (2)$$

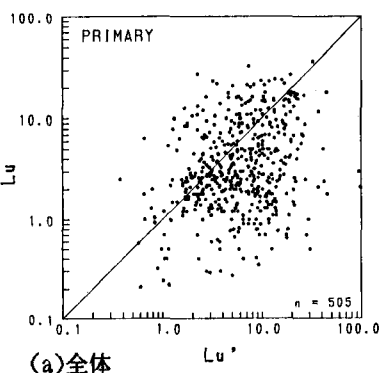
低圧の場合では各点是对角線の上下に均等にばらついているが、高圧の場合は各点がかなり下側に推移しており、高圧の方が改良効果が大きいことがわかる。

これらの図の特徴を数的に表現するために、対角線から各々の縦軸方向の距離(下側正)の和をとったものを改良度として次式で与える。

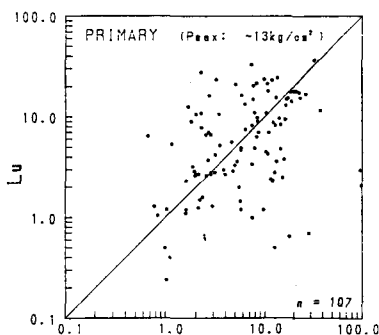
$$\text{改良度} = \frac{1}{n} \sum_{j=1}^n (\log Lu'_j - \log Lu_j) \quad n: \text{データ数} \quad (3)$$

この改良度はルジオン値の対数値の差をとっているため、実数値の差をとる場合と異なり、ルジオン値の大小に影響されない、いわば改良の効率を示す指標であると考えられる。(2)式のグラウト最大圧力と(3)式の改良度の関係を調べたものを図-9に示す。図中、○印、×印、△印はそれぞれ、1次孔位置、2次孔位置、3次孔位置での場合である。多少ばらつきはあるが、全体的に最大圧力を大きくすれば改良度が上昇する傾向にあることがわかる。すなわち、最大圧力を大きくするとグラウトの到達距離が延びて、i+1次孔位置で改良度が増加したといえる。

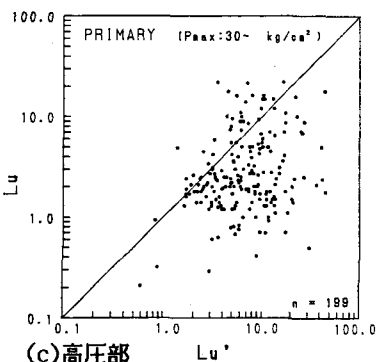
次に、図-10には縦軸に(3)式の改良度ではなく、グラウト注入前と注入後のルジオン値の差 $Lu' - Lu$ をとったものを示す。この図は1次孔位置における、注入前ルジオン値 Lu' の大小別に最大圧力との関係を調べたもの



(a)全体



(b)低圧部



(c)高圧部

図-8 1次孔位置におけるグラウト注入前後のルジオン値

のである。図を見れば、どの場合でも最大圧力を大きくすれば改良効果は概ね上昇傾向にあるが、それ以上に改良効果に影響しているのは、注入前ルジオン値 Lu' の大きさであることがわかる。すなわち、もともとのルジオン値が大きいほどグラウトは注入されやすく、改良効果は大きくなるが、ルジオン値がかなり小さい場合には改良されにくいといえる。

更に、図-11には各次孔毎の最大圧力と注入効率の関係を示す。注入効率は Ce/Lu で定義され、ルジオン値の大きさによらないセメント注入量を表す。したがって、一般には最大圧力を大きくすれば注入効率は大きくなり¹⁾、止水改良に有利であると考えられる。図-11を見れば、どの次孔の場合でも最大圧力を大きくすれば注入効率は一様に上昇するが、圧力が25kg/cm²付近になるとピークを迎え、以後は減少傾向を示している。この原因には岩盤に亀裂閉塞や目づまりが起こったこと、あるいは高压の部分の岩盤性状の違い等が考えられる。しかし、いずれにしても注入効率がある圧力で頭打ち傾向を示したことは、最大圧力をそれ以上大きくしても岩盤の止水改良に大きな効果がないことを意味していると思われる。

6. 結論

以上の解析結果はHダムの場合であり、普遍性を有しているかどうかは今後の検討課題であるが、本研究で得られた結論をまとめれば次のようになる。

- ① 注入度 Ce/P_{max} を導入すると、セメント注入量のみを用いるよりルジオン値との相関性が大きくなり、改良効果の判定にはより有効である。
- ② 岩盤を弾性体とみなすことができる場合にはルジオン値から注入量の推定が可能であるが、低压で限界圧力を示すもろい岩盤では推定が困難である。
- ③ グラウチングによる止水改良効果は、ルジオン値が大きいものほど期待できる。これはセメントミルクが透水性の高い場所に選択的に注入されるためと考えられる。
- ④ グラウトの最大圧力を大きくすれば到達距離は長くなる。しかし、注入効率の結果からみて最大圧力にはある限界点が存在し、それを越えると岩盤全体の止水改良にとっては不利になる。

参考文献

- 1) 松田 達・竹林征三・田村徳郎：ダム基礎岩盤の透水特性とグラウチング効果の評価について、大ダム，No.95，pp.30-51，1981.3.
- 2) 永山 功・吉永格文・津垣昭夫・田代民治：Aダムの基礎処理グラウチングの管理と解析について，第6回岩の力学国内シンポジウム講演論文集，pp.311-316，1984.
- 3) 篠原淑郎：石灰岩地帯のダム基礎処理について，大ダム，No.92，pp.36-65，1980.6.

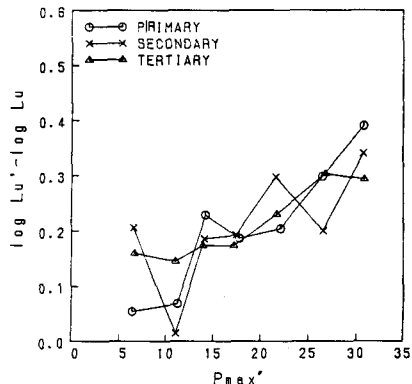


図-9 最大圧力と改良度の関係

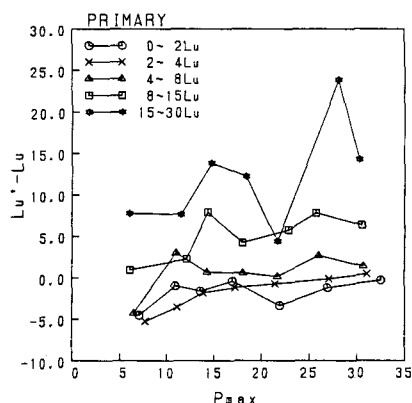


図-10 最大圧力と $Lu'-Lu$ の関係（1次孔）

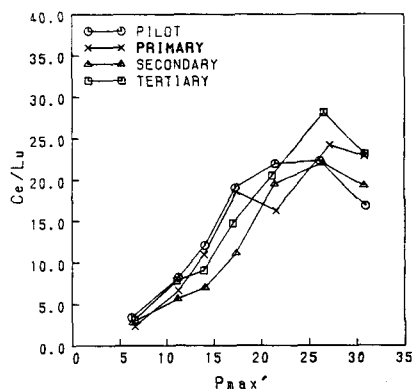


図-11 最大圧力と注入効率の関係