

(4) ダム基礎のグラウチング特性とグラウチング の効果判定に関する一考察

建設省 土木研究所 正会員 新高 庸介
建設省 土木研究所 正会員 永山 功
アイドールエンジニヤリング(株) 正会員 立花 猛
アイドールエンジニヤリング(株) 正会員 ○柳谷 好紀

A Study on Evaluation of Foundation Grouting for Dam

Yosuke NIITAKA, Isao NAGAYAMA,
(Public Works Research Institute, Ministry of Construction)
Takesi TACHIBANA, Yosinori YANAGIYA, (IDOWR INC.)

ABSTRACT

Grouting is a principal technique to improve watertightness of dam foundation. But it is not easy to predict the necessary number of the grout holes and the necessary amount of cement take in advance. In this paper, statistic analysis was carried out in order to evaluate the characteristics of foundation grouting of a dam and predict the watertightness of foundation rock after grout injection. Lugeon value and unit cement take were used in the analysis. The following conclusion was obtained.

- 1) Lugeon Value and unit cement take are expressed by the logarithmic normal distribution.
- 2) There is a linear relationship between the logarithm of Lugeon value and logarithm of unit cement take in a statistical sense.
- 3) There is a linear relationship between the logarithm of unit cement take and the logarithm of Lugeon value after grouting in a statistical sense.
- 4) As the result, the Lugeon value after grouting can be predicted by the Lugeon value before grouting and the injected cement amount.

1. はじめに

ダム基礎岩盤のグラウチングは、セメントを主体とした注入材料によって岩盤内に存在する亀裂などの間隙を充填し、岩盤の遮水性を改良することを目的として実施される。しかし、岩盤の透水特性およびグラウチングのメカニズムはいまだ十分に解明されておらず、その工事は多くの施工実績に基づく試行錯誤的な手法に依存している現状にある。すなわち、グラウチングは、中央内挿法という手法を用いて、ある改良目標に達するまで岩盤中にセメントの注入を幾度も繰り返す工事であり、作業計画、工程管理の難しい工事となっている。そこで、このような状態を改善するために、基礎岩盤のグラウチングの合理的な設計法を確立することが切望されており、岩盤の透水特性およびグラウチング特性を解明することが重要な研究課題となっている。本論文は、亀裂性岩盤のグラウチング特性について、Aダムサイトにおけるカーテングラウチング

の施工実績を基に、統計的手法を用いて考察を行うものである。

Aダム周辺の地質は中生代白亜紀の細粒黒雲母花崗岩、中～粗粒黒雲母花崗岩からなり、一部ひん岩を含んでいる。ダムサイト付近の岩盤は堅硬ではあるが、柱状節理が発達した露頭が多く見られる。Aダムのカーテングラウチングは、図-1に示す範囲に対して、基本孔を3次孔までとして中央内挿法を用いて施工されている。基本孔の最終孔間隔は1.5mである。なお、今回の検討は堤体部のみを対象とした。

2. ルジオン値、単位セメント注入量の分布特性

岩盤の透水性状は一般にルジオン値 L_u で評価されており、また、グラウチングの改良特性はグラウトの注入過程におけるルジオン値とグラウチング孔の単位長さ当たりのセメント注入量 C で評価されている。Aダムにおけるパイロット孔(P孔)のルジオン値(L_u)の分布は、図-2に示すようにヘイズンプロットによる対数正規分布によく当てはまる。また、単位セメント注入量(kg/m)についても図-3に示すようにヘイズンプロットによる対数正規分布に従っている。したがって、以下では $\log L_u$ 、 $\log C$ を解析の基本量として取り扱うものとする。

3. グラウトの注入特性

ダム基礎岩盤のグラウチングにおいて、基礎岩盤の性状は多様であり、セメントミルクの濃度、注入圧力によってグラウトのレオロジー特性も変化することから、単位セメント注入量は同一岩種、同一ルジオン値においても著しくばらつき、改良に要するグラウチングの注入回数、セメント注入量の予測は非常に難しい。

しかし、図-4に示すように、注入箇所のルジオン値の階級別にまとめた $\log L_u$ と $\log C$ の間には高い相関性があり、 $\log L_u$ が小さいほど $\log C$ は小さく、また $\log C$ の標準偏差も減少する傾向を示す。

一方、図-5は注入圧力(kgf/cm²)の対数 $\log P$ と $\log C$ の関係を表したものである。この両者も線形関係にあり、 $\log P$ が大きいほど $\log C$ は増加する傾向にある。そこで、注入圧力別に図-4を再整理すると図-6に示すとおりとなる。図より、 $\log C$ は $\log L_u$ 、

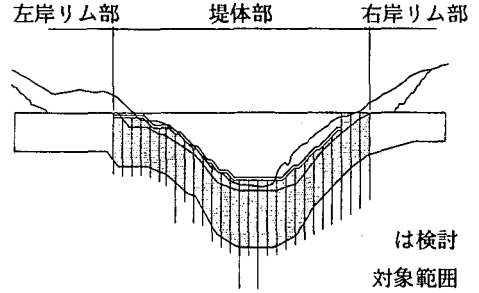


図-1 Aダムにおけるグラウチング範囲

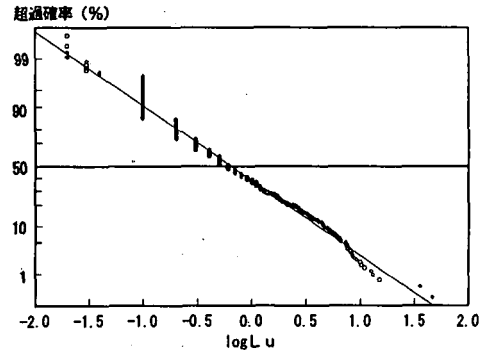


図-2 ルジオン値の頻度分布

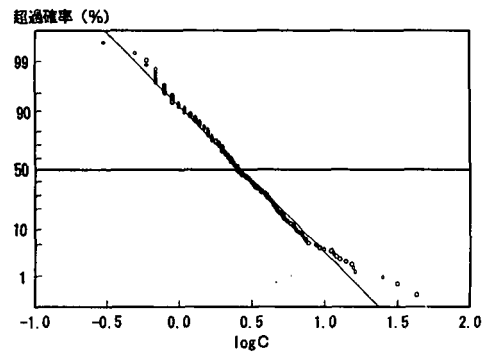


図-3 単位セメント注入量の頻度分布

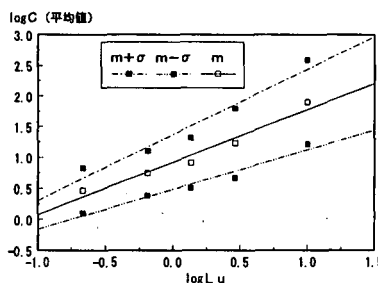


図-4 ルジオン値と単位セメント注入量

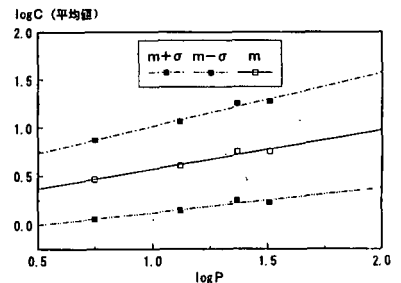


図-5 注入圧力と単位セメント注入量

$\log P$ が大きいほど大きくなるのがわかる。

次に、グラウチングの注入次数別に図-4を再整理すると図-7に示すとおりとなる。 $\log C$ は同じ $\log L u$ でも注入次数によって異なり、注入次数が上がるに従って減少している。すなわち、 $\log C$ は注入次数 n の関数でもある。また、 $\log C$ は $\log L u$ が大きいほど注入次数による影響を受けることがわかる。

以上の結果を総合すると、注入次数 n に対する平均的な単位セメント注入量は次式で近似することができると考えられる。

$$\log C = a(n) \log L u + b(n) \log P + c(n) \cdots (1)$$

この場合、各係数は以下のとおり回帰できる。

$$a(n) = 0.828 - 0.078 \cdot n$$

$$b(n) = 0.694 - 0.065 \cdot n \cdots (2)$$

$$c(n) = 0.218 \text{ (一定)}$$

ここに、 n は注入次数(ただし、パイロット孔は $n=0$ 、チェック孔は $n=4$)

(1)式で予想した $\log C$ と実際に注入されたグラウトから求めた $\log C$ とを比較した結果が図-8である。図によれば、両者の相関係数は0.74と比較的高い値を示している。

さらに、回帰精度を高めるため、注入時間 $t(\text{min})$ を考慮して $\log C$ を単位時間当たりのセメント注入量 $\log(C/t)$ に改め、

$$\log(C/t) = a'(n) \log L u + b'(n) \log P + c'(n) \cdots (3)$$

とすると、各係数は以下のとおり回帰できる。

$$a'(n) = 0.773 - 0.062 \cdot n$$

$$b'(n) = 0.629 - 0.046 \cdot n \cdots (4)$$

$$c'(n) = -0.203$$

この結果を図示したものが図-9である。この場合、相関係数は0.77となり、図-8の場合よりも回帰精度が向上していることがわかる。なお、図-10は注入次数の進行に伴う $\log L u$ の係数 $a'(n)$ と $\log P$ の係数 $b'(n)$ の変化を表したものである。両係数は注入次数が上がるにつれていずれも小さくなっている。

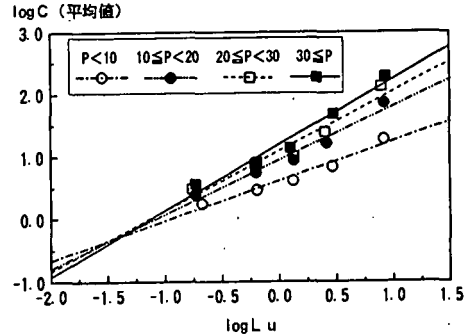


図-6 注入圧力別にみたルジオン値と単位セメント注入量

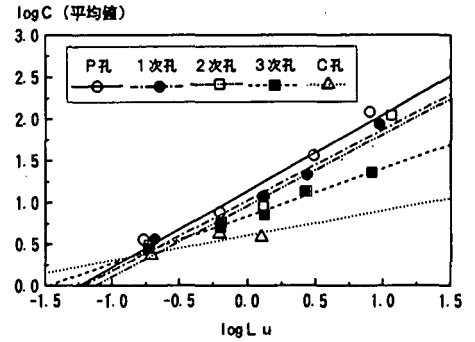


図-7 注入次数毎にみたルジオン値と単位セメント注入量

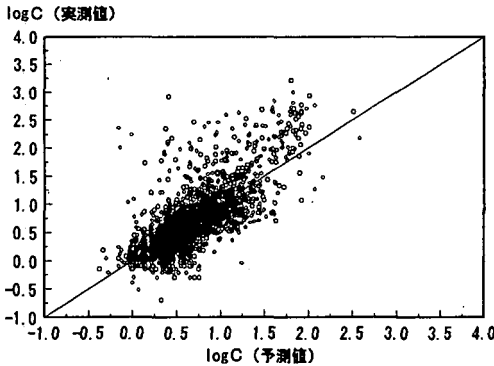


図-8 $\log C$ の予測

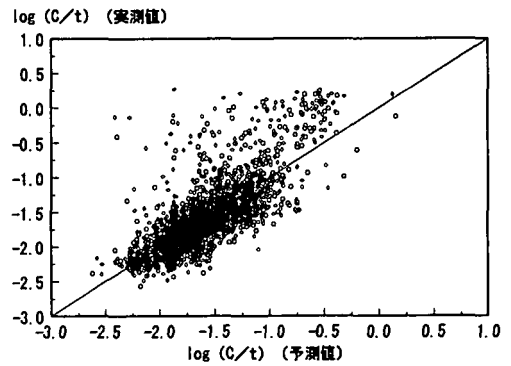


図-9 $\log(C/t)$ の予測

4. グ라우チングによる改良効果の推定

図-11はグラウチングの注入次数の進行に伴う $\log L u$ の平均値と標準偏差の変化を示したものである。図によれば、注入次数の進行に伴って $\log L u$ の平均値、標準偏差はともに減少し、グラフは左下がりの形状となる。これは、図-2でルジオン値の分布を示す直線がその勾配を急にしながら順次左側に移行することを表している。すなわち、Aダムでは大きな割れ目が選択的に改良され、小さな割れ目の改良はそれほど進まなかったことがわかる。

また、図-12はグラウチングの注入次数の進行に伴う $\log C$ の平均値と標準偏差の変化を示したものである。 $\log L u$ の場合と同様に、注入次数の進行に伴って、 $\log C$ の平均値、標準偏差はともに小さくなる傾向にある。

次に、図-13はグラウチングの注入次数の進行に伴う $\log L u$ の平均値と $\log C$ の平均値の変化を示したものである。図によれば $\log L u$ と $\log C$ の間は互いに高い相関性をもって減少していることがわかる。図より、両者の関係式として次式が得られる。

$$\log C = 1.225 + 1.382 \times \log L u \text{ (平均値)} \cdots (5)$$

ダム基礎岩盤のグラウチングにおいて、グラウト注入前のルジオン値や注入された単位セメント注入量からグラウト注入後のルジオン値を推定できれば施工管理上極めて有効である。図-11から図-13によれば、各注入次数毎のルジオン値、単位セメント注入量の間には高い相関性があり、グラウト注入前のルジオン値や単位セメント注入量からグラウト注入後のルジオン値をある程度の精度で推定することが可能であると考えられる。

そこで、図-14は各注入次数におけるグラウト注入前の $\log L u$ とグラウト注入後の $\log L u'$ の関係を示したものである。図より、ルジオン値の改良過程は次の漸化式で表される。

$$\log L u' = -0.152 + 0.818 \times \log L u \text{ (平均値)} \cdots (6)$$

$$\log L u' = -0.132 + 0.830 \times \log L u \text{ (90\%非超過確率値)} \cdots (7)$$

なお、(6)式および(7)式によれば、グラウチングによるルジオン値の改良には限界が存在することがわかる。その値は、 $L u' = L u$ より、平均値で概ね $0.15 L u$ 、90%非超過確率値で $0.17 L u$ と計算される。

次に、図-15は注入されたグラウトから求めた $\log C$ とグラウト注入後の $\log L u'$ の関係を示したものである。図より、両者の関係式として(8)式が得られる。

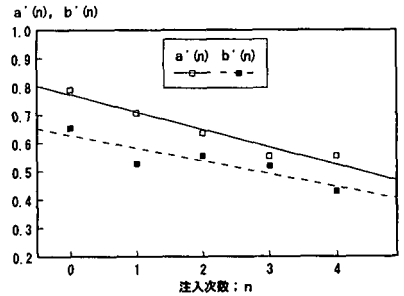


図-10 注入次数進行に伴う回帰式の各係数の変化

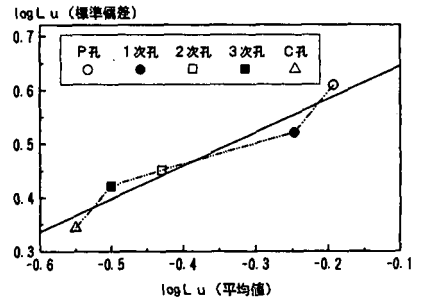


図-11 注入次数の進行に伴う $\log L u$ の平均値と標準偏差の変化

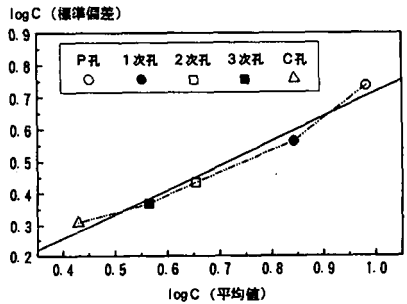


図-12 注入次数の進行に伴う $\log C$ の平均値と標準偏差の変化

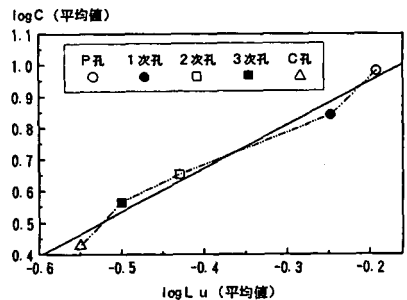


図-13 注入次数の進行に伴う $\log L u$ と $\log C$ の平均値の変化

$$\log L u' = -0.947 + 0.678 \times \log C \text{ (平均値)} \cdots (8)$$

したがって、注入次数の進行に伴って図-14の関係が求まれば、グラウト注入前の水押しテスト時の $\log L u$ からグラウト注入後の $\log L u'$ が推定でき、同様に、注入次数の進行に伴って図-15の関係が求まれば、当該注入次数のグラウティングで注入された $\log C$ からグラウト注入後の $\log L u'$ が推定できることになる。

また、注入次数の進行に伴って図-13、図-14の関係が求まれば、改良目標とするルジオン値に達するまでに必要なセメント注入量は、図-14から推定した各次数ルジオン値に対して図-13から得られる単位セメント注入量の和を求めることによって推定することができる。

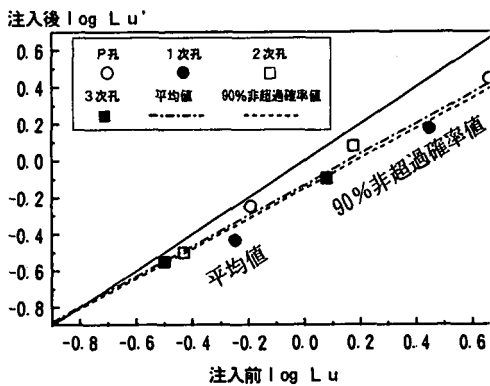


図-14 グラウト注入前のルジオン値と
グラウト注入後のルジオン値

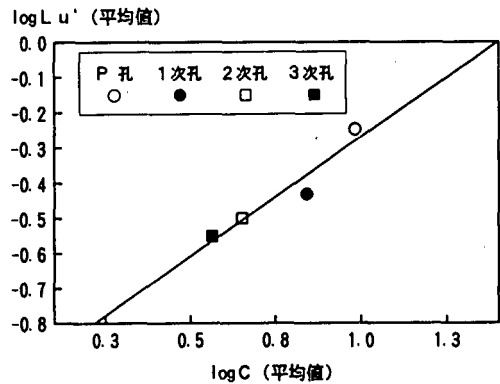


図-15 単位セメント注入量とグラウト
注入後のルジオン値

5. まとめ

本考察は、Aダムサイトでのグラウティング特性を示したものであり、今後、他のサイトで同様な検討を継続して、その普遍性を高めて行かねばならないが、ここで得られた結論をまとめれば次のとおりである。

- ① ルジオン値、単位セメント注入量などのグラウティングの諸指標は対数正規分布で取り扱える。
- ② 対数値の平均で評価したルジオン値と単位セメント注入量の間には高い相関性がある。
- ③ 対数値の平均で評価した注入圧力と単位セメント注入量の間には高い相関性がある。
- ④ 注入次数が上がるにつれて同じルジオン値に対する単位セメント注入量は減少する傾向にある。
- ⑤ グ라우ティングの進行に伴うルジオン値の対数値の変化は等比級数で示される。その結果、ルジオン値の改良限界値が存在する。
- ⑥ グラウト注入後のルジオン値の改良度は、グラウト注入前のルジオン値、単位セメント注入量からある程度の精度で推定することが可能である。
- ⑦ また、②、⑥の結論から、改良目標とするルジオン値に達するまでに必要なセメント注入量を推定することが可能である。

<参考文献>

- 1)建設省河川局開発課監修：グラウティング技術指針・同解説、(財)国土開発技術研究センター、1983.11
- 2)廣田泰久・竹林征三・柴田功：ダム基礎岩盤グラウティングにおける注入量予測、
土木学会論文集第421号/VI-13、1990.9
- 3)永山功・吉永格文：ダム基礎岩盤のグラウティング特性に関する一考察、
第16回岩盤力学に関するシンポジウム講演論文集、1984.2