

◆ ダム分野における新技術特集 ◆

ダム基礎グラウチングの中央内挿法による
遮水性改善効果について

吉田 等* 宮内茂行** 安田裕一***

1. はじめに

ダム基礎グラウチングは、基礎岩盤の遮水性を改良する代表的な工法である。

近年、地質条件が良好でないダムサイトが増えグラウチングの施工数量が増大する傾向にあり、ダム建設コストが増加する一因となっている。このため、建設省ではダム基礎グラウチングの合理化をダム建設コスト縮減のための有力なメニューの1つとして掲げ、ダムの工事現場や土木研究所においてさまざまな取り組みを行っている。

通常、グラウチングは中央内挿法により1次孔、2次孔、3次孔と順次孔間隔を詰めながら施工されるが、改良状況や追加孔の必要性の有無は最終次数孔での改良状況をもとに評価が行われる。本研究は、グラウチングの進捗に伴う施工次数ごとの遮水性の改善状況をより適切に評価することにより、ダム基礎グラウチングの合理化を図ることを目指している。

ここでは、ダムのカーテングラウチングの施工事例を対象に、透水性の指標であるルジオン値や1m当りに注入されたセメント量を示す単位注入セメント量のデータを統計的に処理することにより、中央内挿法による施工次数の進捗に伴う遮水性の改善効果をより適切に評価する手法について検討した結果を紹介する。

2. 解析対象ダムの概要

2.1 ダムサイトの地質概要

解析対象としたダムは堤高53m、堤頂長163m、堤体積100,000m³、総貯水容量1,300,000m³の重力式コンクリートダムである。ダムの基礎岩盤は中生代白亜紀和泉層群の礫岩と砂岩、頁岩、およびその互層からなっている。砂岩は硬質で塊状岩盤をなしている。頁岩及び互層部は砂岩に比べ軟質で割れ目が多くなっている。

岩盤の岩級区分は、風化の程度により新鮮、堅硬なC_H級、わずかに風化しているC_M級、風化しているC_L級、強風化しているD級に分類されている。

ダム軸沿いの岩盤は、着岩面付近がC_M級岩盤を主体として構成され、深部はC_H級岩盤である。C_L級岩盤は左右岸の高標高部と断層沿いに幅1m以下程度の狭い範囲で認められる。左右岸のアバットメント高標高部では岩盤のゆるみによる開口節理および頁岩の風化により、C_L級岩盤が分布している。

ダムサイトの透水性については、図-1に示すとおり概ね5ルジオン以下の低透水性を示し、10ルジオン以上あるいは40ルジオン程度の高い透水性を示す部分がスポット的に存在する。

2.2 カーテングラウチングの概要

2.2.1 施工範囲と孔配置等

対象ダムのカーテングラウチングの施工範囲および孔配置等は、調査時点のルジオンマップおよび既設ダムにおける施工実績等を考慮し以下のとおり設定された。

(1) 改良目標値 2Lu

(2) 施工範囲

図-2に示すとおり深さ方向にはダム高/3+20mを基本に2ルジオン以上のゾーンを包括するように、左右岸のダム軸方向には地山の地下水位とサーチャージ水位の交点までとしている。

(3) 孔配置

孔配置は図-3に示すとおり単列配置とし、パイロット孔間隔12mを基本に、順次中央内挿法により規定孔を3次孔(孔間隔1.5m)まで配置している。

また、1ステージ5mを基本とし、1ステージごとに削孔、水押し、注入を行う、ステージグラウチングを採用している。

2.2.2 注入仕様

カーテングラウチングの注入仕様等は以下の

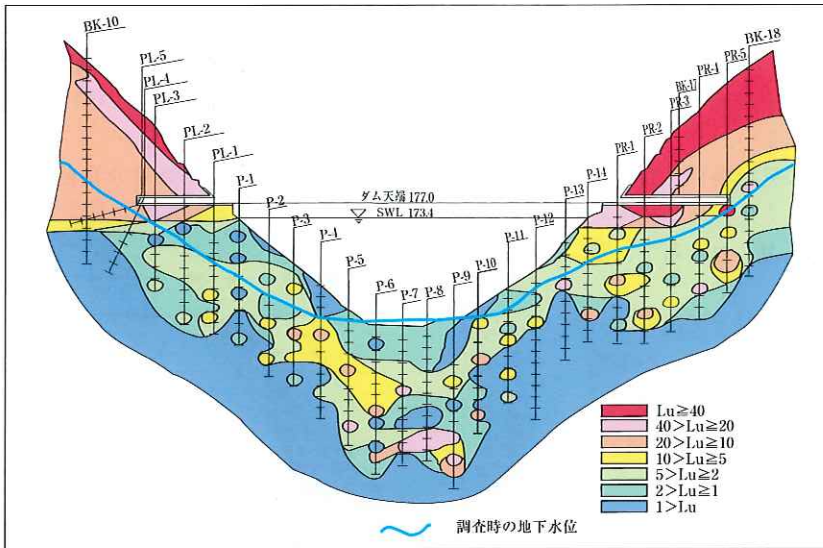


図-1 ダム軸ルジオンマップ

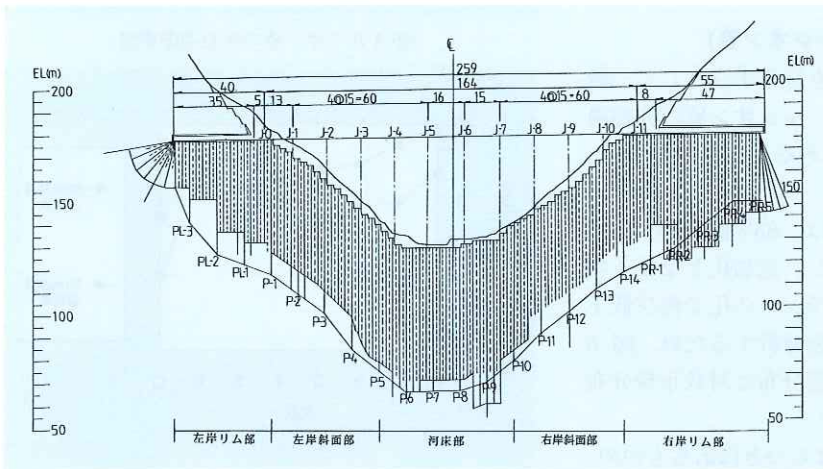


図-2 カーテングラウチングの施工範囲

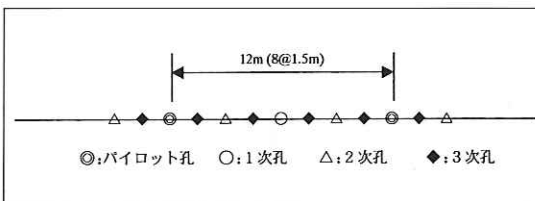


図-3 孔配置図

表-1 注入圧力および注入速度

ステージ	深度 (m)	注入圧力 (N/mm ²)
1	0~7	0.4
2	0~10	0.8
3	10~15	1.0
4	15~20	1.2
5	20~25	1.5
6	25~30	2.0
7~	30~	2.5

とおりである。

(1) 注入材料

高炉セメント B 種

(2) 注入圧力

注入圧力は表-1 に示すとおりである。

(3) 完了基準

グラウチングの完了は以下の 3 つの条件をすべて満足した場合としている。

①最終次数孔での $2Lu$ の非超過確率が 90% 以上のとき

②最終次数孔での $2Lu$ を超えるものの最大値が $4Lu$ 未満のとき

③最終次数孔での $2Lu$ を超えるステージが、縦、横、斜めに連続していないとき

以上の条件のうち、①は最終次数孔の全ステージにおけるルジオン値の分布に関する条件であり、②および③は個別のステージごとのルジオン値に関する条件である。

2.2.3 施工結果概要

全体の施工数量は表-2 のとおりである。

表-2 施工結果概要

項目	規定孔			
	P 孔	1 次孔	2 次孔	3 次孔
平均ルジオン値 (Lu)	7.0	2.7	1.6	1.3
単位注入セメント量 (kg/m)	172.5	35.8	13.8	10.6
ステージ数 (st)	259	222	422	804
	追加孔			チェック
	4 次孔	5 次孔	6 次孔	孔
	1.6	1.6	1.6	0.3
	8.9	3.9	2.7	1.5
	324	61	16	208

3. 検討対象範囲

深度別に見た場合、各部のパイロット孔のルジオン値に大きな差異は認められない。

河床部、斜面部、リム部別に見た場合、右岸リム部については10Lu以上が多く見られ、左岸リム部については2Lu以下が多く見られ、若干、差異が認められた。

詳細な検討を行うとすれば、各部ごとに行うのが適当であるが、統計処理においては大きな母集団であることが望ましく、データ数等を勘案し、ここではすべてのデータを同一母集団として扱い、すべての施工範囲のデータを対象に解析することとした。

4. 解析

4.1 次数別非超過確率図 (ルジオン値)

グラウチングの効果判定を行う手法として一般的に用いられているものが、ルジオン値の非超過確率図およびその低減図である。これらを図-4、図-5に示す。

規定孔である3次孔までは、85%値、50%値とも順次減少している。しかし、追加孔となる4次孔以降は逆に大きくなり、チェック孔で再び低下している。さらにこの傾向を分析するため、図-6に各次数のルジオン値の頻度分布と対数正規分布曲線も示す。

図より、ルジオン値は、ばらつきはあるものの、ほぼ対数正規分布で近似できていることがわかる。

なお、チェック孔については、対数正規分布の近似度がよくないが、これはルジオン値測定の最小単位が0.1Luであるため0.1Lu未満の測定値を0.01Luとしたことによるものである。

また、P, 1, 2, 3次孔の正規確率分布曲線は

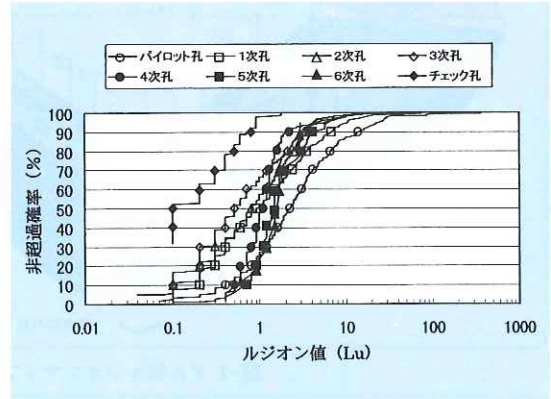


図-4 ルジオン値の非超過確率図

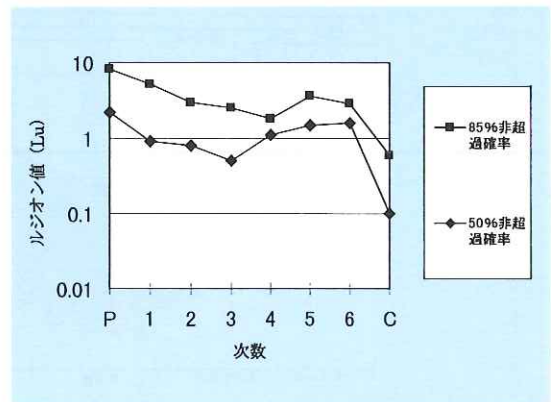


図-5 ルジオン値非超過確率図低減

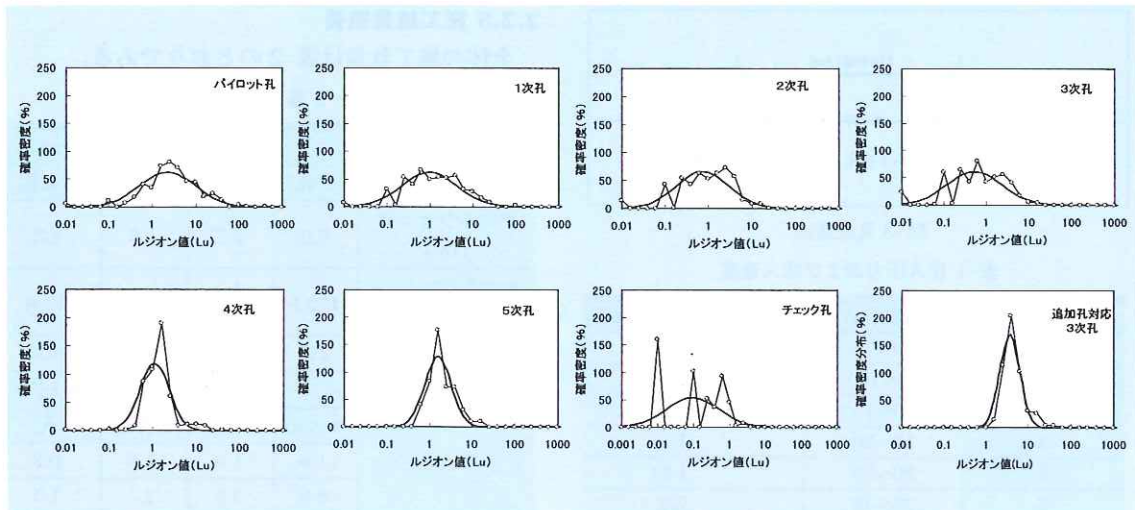


図-6 各次数孔のルジオン値の確率密度分布

概ね同じ形状であるが、4, 5 次孔の正規確率分布曲線は鋭いピークを示している。これは、4, 5 次孔が追加孔であり、2Lu 以上が連続するといった追加基準に該当する場合にだけ施工しているためである。参考までに、3 次孔のうち追加基準に該当するステージを選び出し、その頻度分布を同様に示すと、4 次孔と同様に鋭いピークをもつ形状となっていることがわかる。

以上のことは、規定孔の母集団と追加孔の母集団が異なった性質を持っていることを示している。グラウチングの改良目標値として、改良目標値に対する非超過確率で 85 % 以上と設定している場合が一般的である。しかし、この事例のように、追加孔のルジオン値の頻度分布は規定孔のそれより鋭いピークを示すのが一般的であり、改良目標値に対する非超過確率が多少低くても、ルジオン値全体が低ルジオン値であり、その分布範囲も狭くなっている。したがって、追加孔に対する非超過確率値は規定孔のそれと比べて緩和できる可能性がある。

4.2 単位注入セメント量の分布特性

図-7 に各次数孔の単位注入セメント量の頻度分布を対数正規分布曲線とともに示す。

図より、いずれの次数孔も単位注入セメント量は、ばらつきはあるものの、ほぼ対数正規分布で近似できることがわかる。パイロット孔の分布は、ピークの小さい緩やかな曲線であり、次数が進むほどピークの鋭い分布で平均(中央)値が順次小さくなり、曲線は左に移動する。これは、

次数が進むにつれ、岩盤の空隙がセメントで満たされ、空隙が小さくなり、単位注入セメント量が小さくなることを示している。また、次数が進むとともに大量注入となるような単位注入セメント量の大きくなる事象の発生頻度は小さくなることから、ピークの鋭い分布を示すようになる。

4.3 改良限界および注入限界

前述のとおり、ルジオン値及び単位注入セメント量はほぼ対数正規分布していることから、ルジオン値の対数値の平均値及び標準偏差は次の式で表現される。

$$m = \frac{1}{N} \sum \log Lu$$

$$\sigma = \left(\frac{1}{N-1} \sum (\log Lu - m)^2 \right)^{0.5}$$

ここでは、便宜的に

$$Lu_m = 10^m$$

を平均ルジオン値、

$$Lu_{m+\sigma} = 10^{m+\sigma}$$

を平均値+標準偏差に対応するルジオン値と呼ぶこととする。また、

$$\frac{Lu_{m+\sigma}}{Lu_m} = 10^\sigma$$

をルジオン値のバラツキと呼ぶ。なお、 Lu_m は非超過確率 50% のルジオン値、 Lu_{m+a} は非超過確率

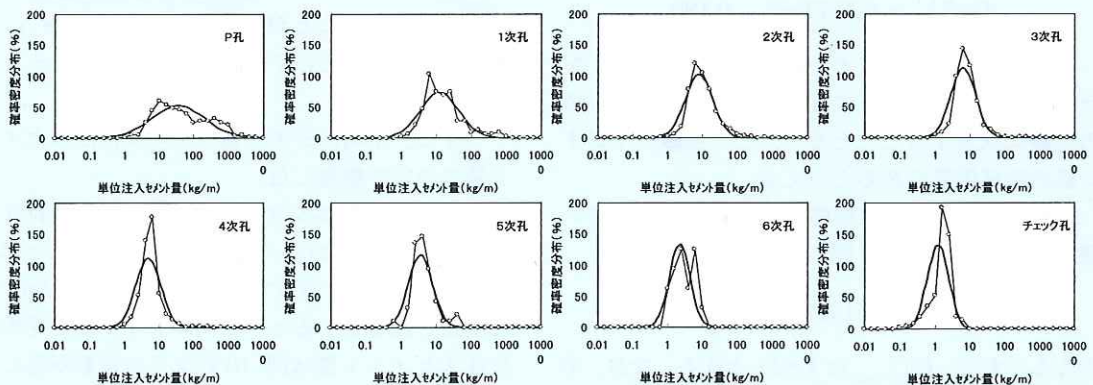


図-7 各次数孔の単位注入セメント量の確率密度分布

85%のルジオン値と概ね一致している。

同様に単位注入セメント量についても、次式で表現される。

$$m = \frac{1}{N} \sum \log Ce$$

$$\sigma = \left(\frac{1}{N-1} \sum (\log Ce - m)^2 \right)^{0.5}$$

平均単位注入セメント量は

$$Ce_m = 10^m$$

平均値+標準偏差に対応する単位注入セメント量は、

$$Ce_{m+\sigma} = 10^{m+\sigma}$$

単位注入セメント量のバラツキは、

$$\frac{Ce_{m+\sigma}}{Ce_m} = 10^\sigma$$

となる。

ところで、グラウチングにおいて、 N 次孔のルジオン値や N 次孔の単位注入セメント量から $N+1$ 次孔のルジオン値を推定できれば、改良効果の推定、施工管理において極めて有効である。

そこで、解析対象グムの平均ルジオン値について、 N 次孔と $N+1$ 次孔の関係を図-8にプロットした。

図より、 N 次孔の対数平均ルジオン値 Lu_m^N と $N+1$ 次孔の Lu_m^{N+1} には、次式のような関係がある (なお、ここで N 次孔のルジオン値を Lu^N と表す)。

$$Lu_m^{N+1} = 0.517 Lu_m^N - 0.180$$

上式によれば、ルジオン値は図の階段のようなラインで示されるように等比級数的に減少し、図の点●に収束することとなり、この点●がルジオン値の改良限界であるといえる。

同様に、平均値+標準偏差に対応するルジオン値について整理すると図-9に示すとおり、

$$Lu_{m+\sigma}^{N+1} = 0.514 Lu_{m+\sigma}^N + 0.129$$

となる。また、 $Lu_{m+\sigma}^\infty$ は $1.8 Lu$ となる。なお、平均値+標準偏差に対応するルジオン値は非超過確率85%のルジオン値に相当する。すなわち、図の点●はグラウチングによる非超過確率85%のルジ

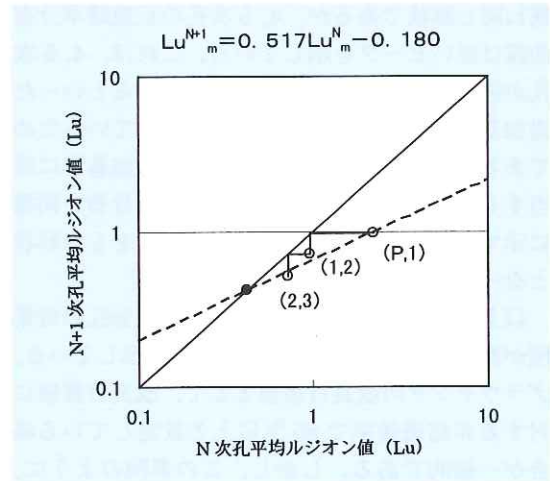


図-8 N 次孔と $N+1$ 次孔の平均ルジオン値

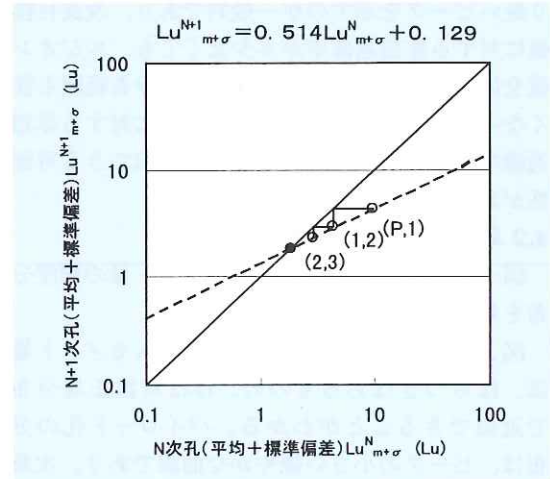


図-9 N 次孔と $N+1$ 次孔の平均ルジオン値 (平均+標準偏差)

オン値の改良限界を示している。

通常グラウチングの改良目標を非超過確率85%値で設定することが一般的であることから、点●は改良目標値としての限界とも言い換えることができる。

つぎに、平均ルジオン値と平均単位注入セメント量について整理した。

N 次孔の平均ルジオン値 Lu_m^N が平均単位注入セメント量 Ce_m^N のセメントが注入されることにより、 $N+1$ 次孔において平均ルジオン値が Lu_m^{N+1} に改良されたとすると、平均ルジオン値と平均単位注入セメント量は図-10のように次数が進むにつれ階段状のラインに沿って低減していく。このとき平均ルジオン値及び平均単位注入セメント量は、 Lu_m^N と Ce_m^N の近似直線と、 Lu_m^{N+1} と Ce_m^N の近

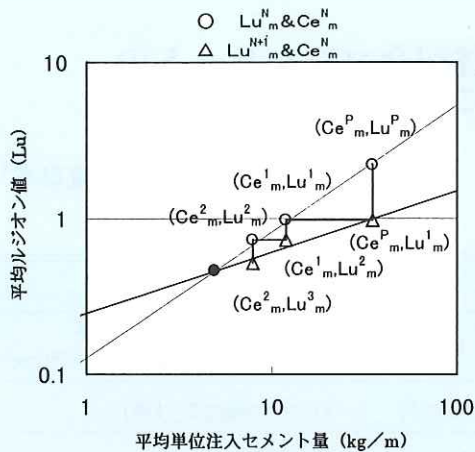


図-10 平均ルジオン値と平均単位注入セメント量
 似直線の交点 (図の点●) に収束する。この点●の
 ルジオン値は改良限界ルジオン値に相当するもの
 であり、その値は $0.46Lu$ である。また、この点
 ●の単位注入セメント量は、次数が進むにつれ、
 注入されるセメント量が少なくなり、その収束値
 といえる。その値は 4.9kg/m 程度である。

なお、この改良限界ルジオン値は N 次孔と $N+1$
 次孔のルジオン値から求めた値 $0.42Lu$ とほぼ同
 等であり、いずれの推定方法もほぼ妥当な手法で
 あると考えられる。

5. まとめ

- ① グラウチング時の岩盤のルジオン値及び単位注
 入セメント量の分布は対数正規分布に従う。
- ② 規定孔のルジオン値と追加孔のルジオン値の母
 集団は異なる特性を持つ。したがって、グラウ
 チング結果を統計処理する場合、このことに留
 意しなければならない。
- ③ ルジオン値の対数値の平均値、平均値+標準偏
 差に対応するルジオン値は、次数の変化に関し
 て、等比級数的に変化し、ルジオン値には改良
 限界があると考えられる。
- ④ 単位注入セメント量の対数値の平均値もルジオ
 ン値と同様に等比級数的に変化し、ある限界値
 に収束する。

吉田 等*



建設省土木研究所ダム部
 ダム構造研究室長
 Hitoshi YOSHIDA

宮内茂行**



同 ダム構造研究室主任研究員
 Shigeyuki MIYAUCHI

安田裕一***



同 ダム構造研究室
 Yuichi YASUDA