

ダム基礎岩盤グラウチングにおける注入量予測 —花崗岩を基礎とするダム—

PREDICTION OF GROUT TAKE IN DAM FOUNDATION GROUTING —A CASE OF GRANITE—

廣田泰久*・竹林征三**・柴田 功***

By Yasuhisa HIROTA, Seizo TAKEBAYASHI and Isao SHIBATA

Although foundation grouting for dams is always performed as one of the most important foundation treatment works, the prediction of necessary cement takes is considered to be difficult. In this paper, several dam grouting projects of granitic rock foundations which have similar specifications have been reviewed, and the results indicate that there exists good correlations between Lugeon value and unit cement takes in grouting procedure.

In field practice, Lugeon value is obtained by using the water pressure tests prior to the grout injection, and the value is used for determining the details of further grouting works. The value suggests the properties of rock foundations, but it has been considered to be irrespective of cement grout takes. The study of this paper concludes, however, that total amount of grout takes can be predicted from the initial Lugeon value macroscopically.

Keywords: dam foundation grouting, grout curtain, Lugeon, prediction, total cement absorption

1. ま え が き

ダム建設工事においては、その基礎岩盤に存在する亀裂を通る浸透流を抑制する主工法として、セメントグラウチングが行われている。近代的技术をもって築造されたアメリカ合衆国のTetonダムが1976年に、初めての湛水時に決壊したが、基礎グラウチングの設計・施工の不備がその主な原因の1つではないかと考えられることからみても、その重要性をうかがい知ることができよう。

ダム基礎岩盤グラウチングはこのように重要なものであるにもかかわらず、岩盤の状況が多種多様であるため、その設計・施工は担当技術者の経験と技量に頼ることが多く、他ダムでの孔配置や注入仕様を参考として工事が進められている。

岩盤深所の割れ目の状況を知るため、グラウチングに先行して水押し試験によってルジオン値を求め、その値によってグラウトの濃度や圧力等を定めることが行われ

ている。このように、ルジオン値は岩盤内の亀裂の状況を知る手段としては最も優れているものと考えられる。しかし、岩盤への水の入り方から求められたルジオン値と、セメント懸濁液を注入するダム基礎グラウチングにおけるセメント注入量との間には、岩盤状況が多様であるうえ、水と注入材のレオロジーが著しく異なることから、理論的に明瞭な関係を求めにくく、ルジオン値からセメント注入量を予測するのは困難だとする悲観的な意見が、ダム技術研究の最大の機構である国際大ダム会議の最近の報告でも発表されている^{1),2)}。

このように、ダム基礎岩盤グラウチングでは、工事着手前に所要セメント注入量を予測することが困難であるのが技術レベルの現状であり、その解明が急務とされている。

このような問題解明の手法としては、理論に基づく基礎研究を川上の研究とするならば、応用技術を重用する帰納的な川下の研究もまた大切である。すなわち、現場情報を尊重し、それを分析し、その中に解決のカギがないかを調べるという方法である。

幸い、わが国ではグラウチングの主な仕様が類似している施工例が増えつつあり^{3),4)}、また、施工結果の詳細をコンピューターに入力して処理できるようになってき

* 正会員 明石工業高等専門学校 土木工学科
(〒610-03 京都府綴喜郡田辺町新長尾谷 22-30)

** 正会員 工修 建設省河川局開発課 開発調整官
(〒538 志木市宗岡 2-4-21)

*** 正会員 (財)ダム技術センター 理事
(〒174 板橋区中台 3-27-1-912)

表一 グラウト孔の注入順序と孔間隔

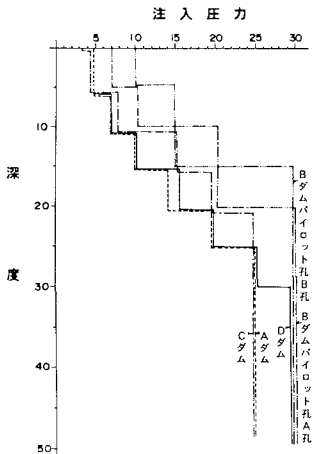
ダム名	列数	孔間隔及び施工順 (チェック孔を除く)	追加孔配置	
A	1列	パイロット孔 12.0m S 孔 6.0 T 孔 3.0 F 孔 1.5 (目孔) 0.75	左右岸着岸部	
B	1列	パイロット孔 12.0m A 1 孔 6.0 A 2 孔 3.0 B 孔 1.5		
C	1列	パイロット孔 12.0m A' 孔 6.0 A 孔 3.0 B 孔 1.5 (追加孔) 0.75	左岸斜面部及び右岸斜面部に施工	
D	1列	パイロット孔 12.0m A-1 孔 6.0 A-2 孔 3.0 A-3 孔 1.5 (A-4 孔) 0.75	F-1 1 行近及び逸部	

() は設計上「追加孔」とされるもの。 孔間隔は複数列の場合投影後で表示。

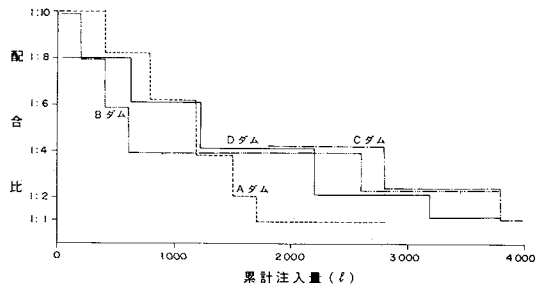
表二 主な注入仕様

ダム名	区分	注入圧力							上段 ミルク濃度 (C:W)					注入速度 (ℓ/min/m)	完了基準	
		下段圧力 (kg/cm ²)							下段 切替基準							
A		0~5	5~10	10~15	15~20	20~25	25~30	30~35	1:10	1:8	1:6	1:4	1:2	1:1	4.0	2.0Lu 85~90%
B	パイロット孔 A 孔 チェック孔 B 孔	0~5	5~10	10~15	15~20	20~25	25~30	30~35	1:10 (3以下) 200	1:8 (5~10) 200	1:6 (10~20) 200	1:4 (20以上) 200	1:2 200	1:1	2.0	1.0Lu 85~90%
C	パイロット孔 A 孔	0~5	5~10	10~15	15~20	20~25	25~30	30~35	1:10	1:8	1:6	1:4	1:2	1:1	6.0	1.0Lu 85~90%
D		0~5	5~10	10~15	15~20	20~25	25~30	30~35	1:8	1:6	1:4	1:2	1:1		2.0Lu 85% (本体)	

*1 () ; 開始配合を定めるルジオン値
*2 注) この表は原則を示したものであり、細則については記載していない。



図一 注入圧力



図二 グラウトの濃度

たので、上述のような方法の精度が上がってきたと考えられる⁵¹⁻⁷⁾。

本報文では、花崗岩類を基礎とするダムについて、その実績に基づいて分析研究した結果、工事当初に行うルジオン試験の結果から最終の全セメント注入量の予測が可能であることを明らかにしたので、これを報告するものである。

2. 解析対象ダム

全国的には多数のダムがあるが、本報文は花崗岩類を

基礎とするコンクリート重力ダムで、グラウチングの主な仕様が次のようなものを対象とした。

a) グラウトカーテンの範囲

深部の透水性が1~2 Lu の低透水ゾーンに着岩させるように範囲を決めることとしているもの。

b) 中央内挿法によって注入次数をあげる。

パイロット孔の間隔が12 m、その中央6 m間隔の1次孔、さらにその中央の3 m間隔の2次孔のように順次注入次数をあげることとしているもの(表一参照)。

c) 注入ステージ長

5 mとしているもの。

d) 注入材料

セメント。

e) 注入圧力

深くなるにつれて昇圧することとしているもの(図一

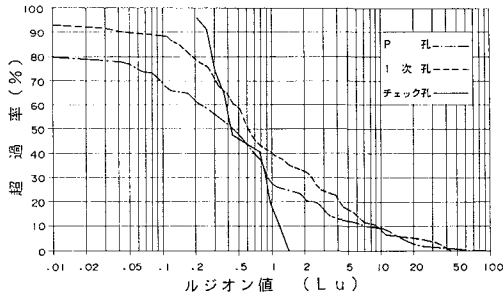


図-3(a) Aダム 施工回数とルジオン値低減超過率

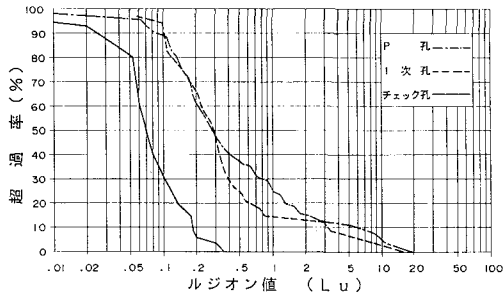


図-3(b) Bダム 施工回数とルジオン値低減超過率

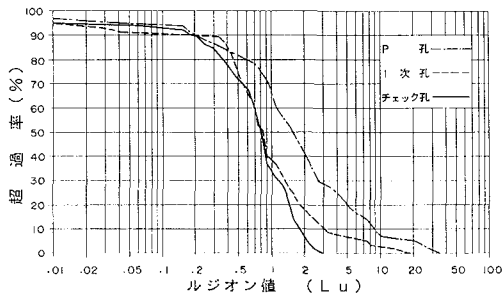


図-3(c) Cダム 施工回数とルジオン値低減超過率

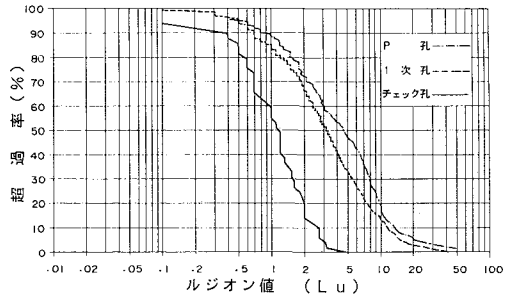


図-3(d) Dダム (右岸上部) 施工回数とルジオン値低減超過率

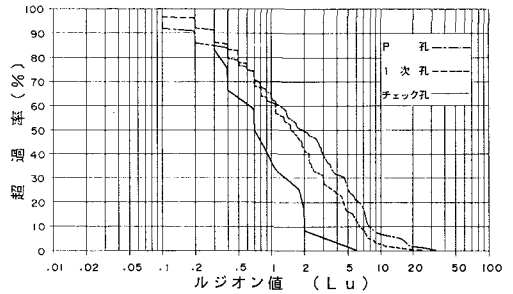


図-3(e) Dダム (右岸下部) 施工回数とルジオン値低減超過率

1, 表-2 参照).

f) グラウトの濃度

注入量が増加するにつれて濃くすることとしているもの (図-2, 表-2 参照).

g) 注入速度

2~4 l/min/m (表-2 参照).

h) 終了基準

85% が 2 Lu 以下になることとしているもの (図-3 (a)~(e), 表-2 参照).

3. 岩盤の透水性

(1) 透水性

a) A ダム

このダムは高さ 34 m, 堤頂長 127 m で, 基礎は, 広島型の堅硬緻密な黒雲母花崗岩である. その透水性を示すパイロット孔によるルジオンマップは図-4(a) のと

おりである.

b) B ダム

このダムは高さ 60.5 m, 堤頂長 210 m で, 領家帯の粗粒および中粒の黒雲母花崗岩からなり, 風化の影響をあまり受けていない. その透水性を示すパイロット孔によるルジオンマップは図-4(b) のとおりである.

c) C ダム

このダムは高さ 62.0 m, 堤頂長 120.5 m で, 領家帯の中~細粒の花崗岩 (一部では花崗せん緑岩) からなる. 風化変質による局部的軟質化部を除けば全般に堅硬である. その透水性を示すパイロット孔によるルジオンマップは図-4(c) のとおりである.

d) D ダム

このダムは高さ 107 m, 堤頂長 338 m で, 高瀬型の中~粗粒の黒雲母花崗岩で, 飛驒山地東縁に当たり, 高瀬川圧砕帯等に近いので, 比較的にもめているゾーンがある. 風化の影響が少なく透水性の低い河床右岸寄りや D-1, 右岸上部の断層や風化の影響を受け透水性が高い部分を D-2 として解析した. パイロット孔によるルジオンマップは図-4(d) に示すとおりである.

(2) ルジオン値の分布特性

前述のように, グラウトの主な仕様が近似している花崗岩を基礎とするダムについては, 工事初期のルジオン値出現のヒストグラムを書くと図-5 のようになる. こ

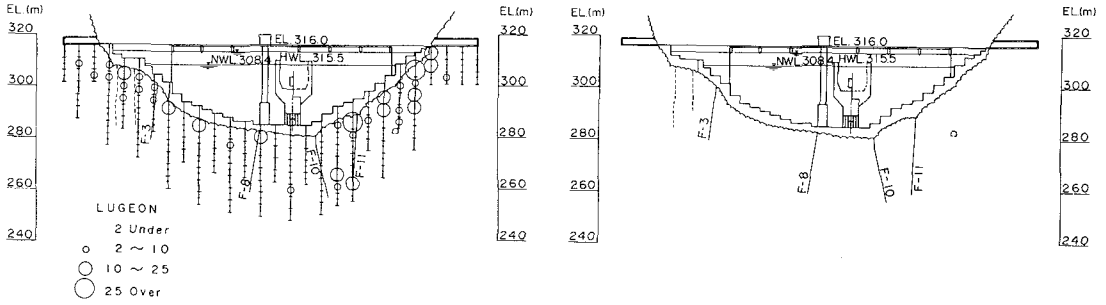


図-4(a) Aダム パイロット孔ルジオンマップおよび地質断面

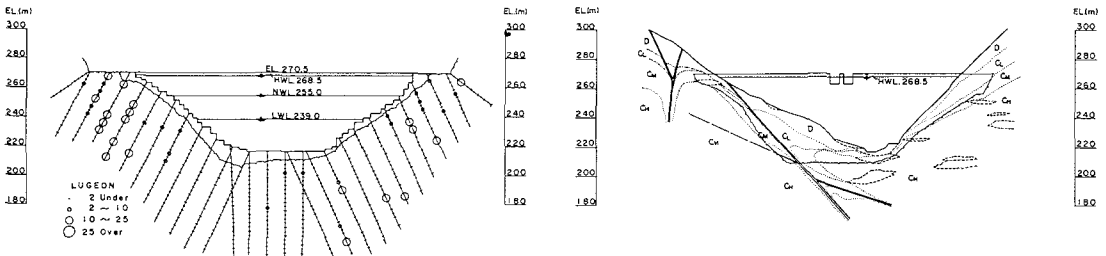


図-4(b) Bダム パイロット孔ルジオンマップおよび地質断面

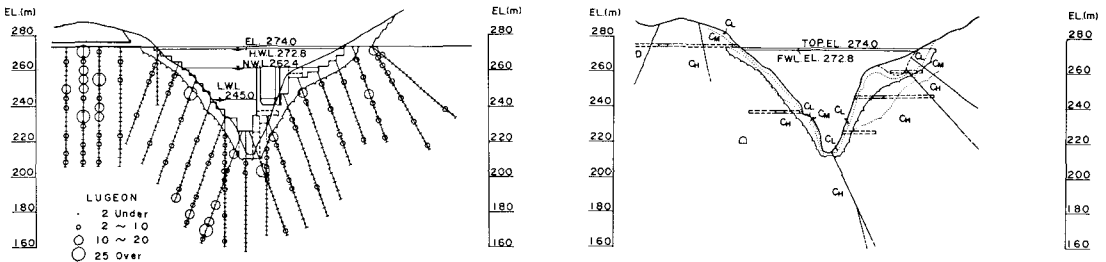


図-4(c) Cダム パイロット孔ルジオンマップおよび地質断面

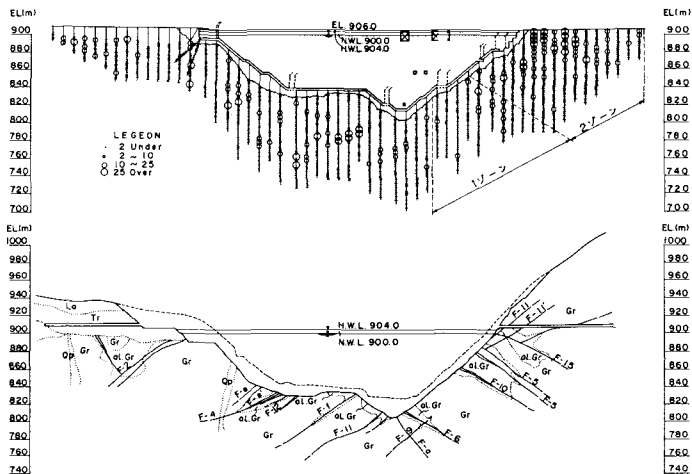


図-4(d) Dダム パイロット孔ルジオンマップおよび地質断面

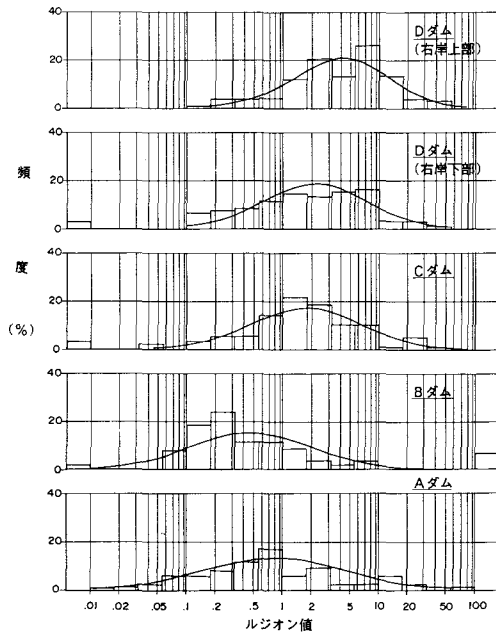


図-5 ルジオン値頻度分布

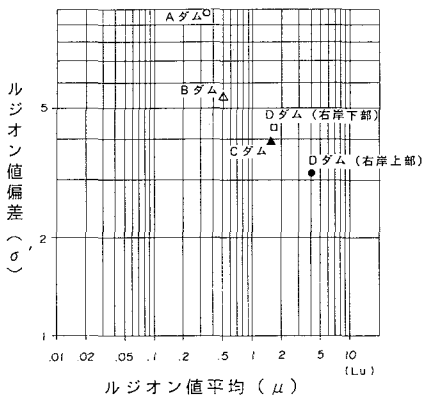


図-6 ルジオン値の平均値 (μ) と偏差 (σ')

の図によるとルジオン値は、巨視的には対数正規分布を示すものと考えてよい⁷⁾。

新鮮で堅硬緻密な岩盤では、まれに開口した亀裂に遭遇したステージで高いルジオン値を示すけれども、亀裂は密着したものが多いので、全体としてみるとルジオン値の分布は平均値が小さく、ばらつき、すなわち偏差は大きくなるはずである。一方緩んだ岩盤では、大きな開口亀裂が多いので、ルジオン値の分布は平均値が大きく、その影響を受けて偏差が小さく表現されるものと考えられる。そこで、平均ルジオン値と偏差の関係を対数表示すると図-6のようになり、図-5、図-6と合わせてみると、上述の推論を裏付けている。

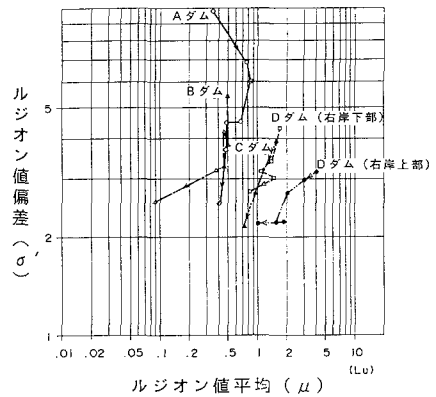


図-7 注入の進行に伴うルジオン値の平均 (μ) と偏差 (σ') の移り変わり

4. グ라우チング過程におけるルジオン値の推移

ダム基礎グラウチングにおいて、粗い間隔から中央内挿法によって順次間隔を狭めたグラウト孔から注入することを、注入次数を上げていくと称する。その注入次数の上昇につれての改良過程において、注入前のルジオン値の平均値と偏差を表示すると図-7のとおりで、一様に低下して、取れんする傾向をみせる⁷⁾。この図によると、初期において平均値が小さく偏差の大きい堅硬緻密な岩盤では、注入の効果はルジオン値が大きいステージのみにおいて発揮され、分布の特性としては、偏差の減少によって表わされる。しかしながら、全体に亀裂が少ないため平均値は変わらず、偏差減少型となる。これに対して、緩んでいるため初期において平均値が大きく、元々偏差が小さい岩盤では、亀裂に遭遇する機会が多いので、各ステージでの改良のされ方を示す偏差は変わらず、平均値減少型となる。

後者では、注入次数が上がって改良が進むにつれて、前者の型と合併されることも予想されるのだが、そのような減少は、この解析では認められておらず、今後の研究が待たれる。

5. グ라우チング過程におけるルジオン値と単位長さ当たりセメント注入量の推移

ダム基礎グラウチングでは、改良に要するセメント注入量は、同一岩種においてもばらつきが大きく、必ずしも一意に判断することは困難であると考えられている。しかしながら、注入次数を上げてゆく施工過程における各次数での、注入前のルジオン値の平均値とその次数での単位長さ当たり注入セメント（今後単位セメント量とよぶことにする）の平均値との関係を見ると、図-8(a)~(e)のようになり、岩盤の状態の相違にもかかわらず

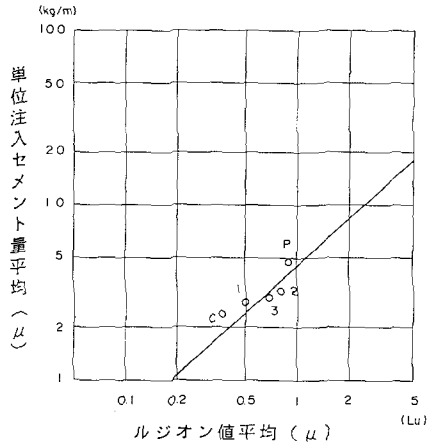


図-8(a) Aダム ルジオン値の平均値 (μ) と単位セメント注入量の平均値 (μ)

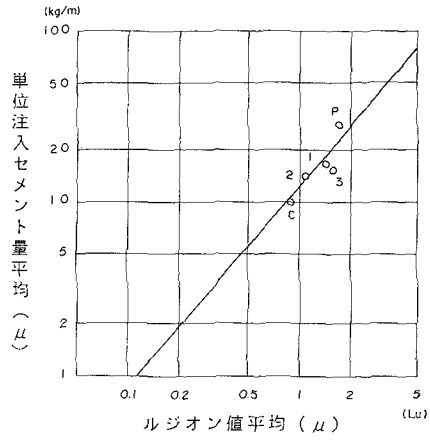


図-8(d) Dダム (右岸上部) ルジオン値の平均値 (μ) と単位セメント注入量の平均値 (μ)

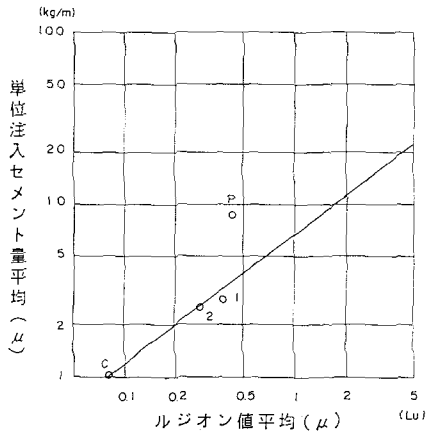


図-8(b) Bダム ルジオン値の平均値 (μ) と単位セメント注入量の平均値 (μ)

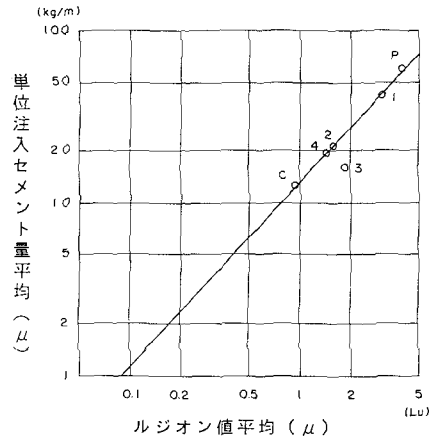


図-8(e) Dダム (右岸下部) ルジオン値の平均値 (μ) と単位セメント注入量の平均値 (μ)

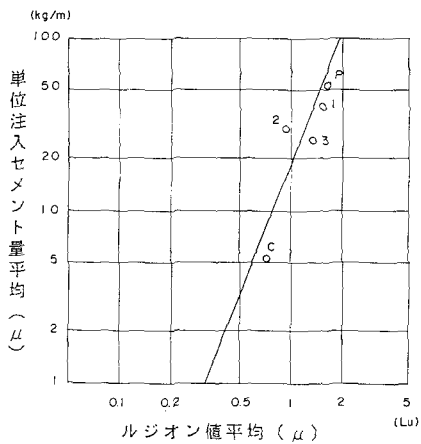
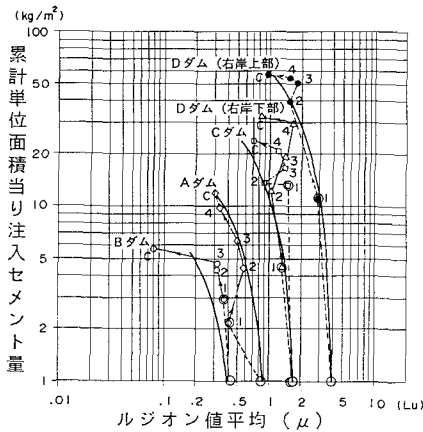


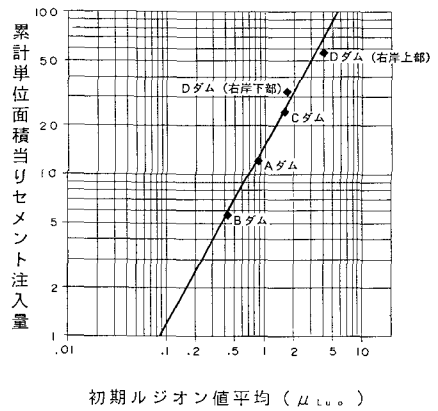
図-8(c) Cダム ルジオン値の平均値 (μ) と単位セメント注入量の平均値 (μ)

巨視的には強い相関を示し、単位セメント量も対数正規分布をするとして取り扱えることが示される。

また、この図によれば単位セメント量は、グラウチングの初期において大きい、次数の進行につれて指数関数的に減少することが示されている。これは、注入次数が上がるにつれて、大きな亀裂は、先行したグラウチングによって充填されるので、ルジオン値が低下するとともにセメントグラウトが入りにくくなること、特に4次孔以降の追加孔では、先行したステージの中で不都合のあるところに削孔するものであり、わずかな部分の改良のために十分に難透水となっている補強されたゾーンをも対象とするため、ルジオン値、単位セメント量とも小さな値を示すようになることを表わしている。



図一〇 注入の進行に伴うルジオン値の平均値 (μ) と累計単位面積当り注入セメント量の移り変り



図一〇 初期ルジオン値の平均値 (μ) と累計単位面積当り注入セメント量

6. グ라우チング過程におけるルジオン値と全セメント量の推移

グラウチングの施工が進んで注入次数が上がってくると前項で述べたように単位セメント量が著しく減少する。このことは、注入次数が上がってくるにつれてセメントを受け入れる亀裂がきわめて少なくなって所定のルジオン値に改良されるとともに、全注入セメント量がある値に落ち着くことを示すと考えられる。

そこで、各注入次数における注入前のルジオン値の平均値と、その次数までの全注入セメント量をグラウトカーテンの単位面積当たりに換算した値とを、両対数グラフにプロットすると、図一〇のようになる。

この図によると、グラウチング過程の各注入次数におけるルジオン値とその次数までの全注入セメント量の関係は、近似的に、全注入セメント注入量が無限小のとき初期のルジオン値で一定の値となる鉛直線を漸近線とする曲線として次のように示せる。

$$\log L_{uo} - \log L_{ui} = a \cdot e^{n \log C} \dots \dots \dots (1)$$

ここに、 L_{uo} ：初期のルジオン値の平均値

L_{ui} ：各注入次数における注入前のルジオン値の平均値

C ：各注入次数までに注入したグラウトカーテン単位面積当たりの全注入セメント量

a, n ：定数

式(1)を変形すると

$$\log(L_{uo}/L_{ui}) = a \cdot C^n \dots \dots \dots (2)$$

となる。

定数 a, n の図一〇にプロットした関係に適合する値は、

$$n=1 \quad a=1/25 L_{uo}$$

であり、この式で示される曲線は、図一〇に併記したと

おりになる。

グラウチングが終了した段階のルジオン値 L_{ur} は、グラウチングの設計値であるから、ある一定の有限値でなければならず、式(2)の左辺は、初期のルジオン値の平均値に対応した値となる。

したがって、

$$C = F(L_{uo}) \dots \dots \dots (3)$$

となるから、初期のルジオン値の平均値 L_{uo} によって、グラウチングに所要の全注入セメント量を求めることができる。

このような関係を前述の各ダムについて整理してみると図一〇のようになる。この図から初期ルジオン値と全注入セメント量との間には強い相関があり、式(3)は次のようになる。

$$C = 15 L_{uo}^{1.1} \dots \dots \dots (4)$$

上述のように、花崗岩を基礎とするダムのグラウチングについて分析研究した結果、工事当初に行うルジオン試験による初期のルジオン値の平均値 L_{uo} から、工事に所要の全セメント注入量を巨視的に予測できることが明らかになった。

7. ま と め

ダム基礎岩盤グラウチングは、最も重要な基礎処理として必ず施工されているにもかかわらず、所要のセメント注入量を予測することは困難であると考えられている。

花崗岩を基礎とするダム基礎岩盤グラウチングについて、グラウチングの主な仕様が類似している施工実績を分析・研究した結果、グラウチング過程におけるルジオン値および単位セメント量が対数正規分布であり、ルジオン値の平均値および単位セメント量の平均の間に相関があることが示された。

現場では、グラウチングに先行しての水押し試験によってルジオン値を求め、作業の詳細を決めることが行われる。このルジオン値は岩盤の状態を示しているものと考えられるけれども、セメントグラウトの注入とは特定の関係がないとされていたが、本研究によると全注入セメント量 C は、初期のルジオン値 L_{u0} の関数として示され、巨視的に予測ができることが明らかになった。

このような関係は、著者らの研究によると他の岩種で、グラウチングの主な仕様の異なるものでも認められている。したがって、ダム基礎岩盤グラウチングの設計・施工の手法を類似させることによって、種々の岩種の岩盤についても注入量予測が可能になるものと考えられるので、今後の研究の進展が望まれる。またグラウトカーテンの範囲が広い場合には、岩種やルジオン値分布に基づいていくつかに区分して、同様の関係を求め、それらを合算すれば精度がよくなるものと考えられる。

最後に、本稿をまとめるにあたり、岡本政明氏、川邊雅夫氏には多大のご協力をいただいたことを記し、謝意を表します。

参 考 文 献

- 1) Lombardi, G. : The Role of Cohesion in Cement Grouting of Rock, 15th International Congress on Large Dams, Lausanne, 1985, Q. 58, R. 13.
- 2) Kutzner, C. : Considerations on Rock Permeability and Grouting Criteria, 15th International Congress on Large Dams, Lausanne, 1985, Q. 58, R. 17.
- 3) 建設省開発課・建設省土木研究所：ダム基礎グラウチングに関する研究，第34回～36回建設省技術研究会報告，1980～1982.
- 4) 土木学会岩盤力学委員会：ダム基礎岩盤グラウチングの施工指針，土木学会，1985.
- 5) 廣田泰久・竹林征三・栗田昭郎・田村徳郎・森国康夫：真名川ダムの基礎グラウチング(1)，土木技術，第32巻，第9号，1977.9.
- 6) 廣田泰久・竹林征三・栗田昭郎・田村徳郎・森国康夫：真名川ダムの基礎グラウチング(2)，土木技術，第32巻，第10号，1977.10.
- 7) 松田 達・竹林征三・田村徳郎：ダム基礎の透水性とグラウチングの効果について，大ダム，No. 95, 1981.3.

(1990.5.18・受付)