

◆特集：新しい時代に向けたダム技術◆

カーテングラウチングによるダム基礎岩盤の
遮水性改良度の評価方法

永山 功*

1. はじめに

ダムの貯水機能を確保するため、ダムの周辺の岩盤は所要の遮水性を有していなければならない。このような要求性能を満たす方法として一般的に採用されているのがグラウトカーテンと呼ばれる遮水ゾーンをダムの基礎部および両翼部（リム部）（以下、特に断らない限り、両者をあわせて基礎岩盤という）に構築する方法である。また、このグラウトカーテンを構築する作業をカーテングラウチングと呼んでいる。

一般に、基礎岩盤内における水の流れのメカニズムは複雑であり、基礎岩盤に要求される遮水性を解析的なアプローチから求めることは現状では困難といえる。このため、カーテングラウチングによる基礎岩盤の改良目標値は、これまでの経験に基づいた技術的判断によって定められてきた。すなわち、従来より、コンクリートダムの基礎岩盤の場合には1～2Lu、フィルダムの基礎岩盤の場合には2～5Luの範囲で改良目標値が定められてきた¹⁾。

また、基礎岩盤の遮水性を改良目標値まで改良するにはどの程度の孔間隔でカーテングラウチングを施工したらよいのか。これを解析的に求めることも同様に困難であった。このため、中央内挿法と呼ばれる施工方法、すなわち、所定の改良目標値に達するまで、順次孔間隔を詰めてグラウチングを実施する方法が採用されてきた。そして、このとき、規定孔と追加孔という概念が導入され、規定孔まではグラウチングを必ず実施し、それでも改良目標値が達成できない場合には追加孔を実施するという方法が一般に採用されてきた。また、この際、規定孔間隔は1.5mとするのが一般的であった。

ところが、平成15年度に改定されたグラウチング技術指針²⁾では、グラウチングの考え方に大きな見直しが行なわれた。すなわち、多くの部分で性能規定的な考えが導入され、従来、不合理と考えられていた数値の見直しもあわせて行われた。たとえば、コンクリートダムとフィルダムとで改良目標値が異なるのは明らかに不合理であり、新指針では、ダム形式によらず、地質性状に応じて2～5Luの範囲で改良目標値を定めることとなっている（ただし、コンクリートダムの直下の基礎については、基礎排水孔によって生じる大きな動水勾配に対処するため、改良目標値を厳しく設定している）。

また、規定孔の間隔を1.5mに固定することについても合理的な根拠はなく、改定された指針では、必要十分な規模のグラウチングとなるように、施工段階で規定孔間隔の妥当性を随時見直していくこととしている。

本報文では、このような背景を受け、カーテングラウチング孔の孔間隔の評価方法とカーテングラウチングによる改良効果の判定方法について考察を加えたものである。

2. 検討したダム基礎岩盤の概要

本検討で事例として採り上げたダムは堤高53m、堤頂長163mの重力式コンクリートダムである。基礎岩盤は中生代白亜紀の和泉層群の砂岩、頁岩およびその互層からなっている。ダムの基礎岩盤の岩級区分は主としてC_H、C_M級岩盤であり、左右岸アバットメント上部ではC_L級岩盤を基礎としている。

また、当ダムでのグラウチングの仕様として、注入圧力は表-1のとおりとし、グラウトの注入開始濃度（水とセメントの質量混合比 W : C）は、水押し試験で得られた透水性が10Lu未満の場合には10 : 1、10Lu以上の場合には8 : 1、20Lu以上の場合には6 : 1、50Lu以上の場合には4 : 1と

Evaluation of Improving Water-tightness of Dam Foundation by
Curtain Grouting.

表-1 グラウトの注入圧力

ステージ	深度 (m)	注入圧力 (N/mm ²)
1	0～5	0.4
2	5～10	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

規定している。

なお、ここで詳細な解析を実施するためには、ダム基礎部とリム部とを区別して取り扱うのが適切と考えられるが、統計処理を行う際のデータ数なども勘案して、ここでは全てのデータを同一母集団からなるものとして取り扱っている。ちなみに、対数平均したグラウチング開始前のルジオン値の深度方向分布をダムの基礎部とリム部に分けて表示すると図-1のようである。

3. 解析結果

3.1 従来のとりまとめ方法

従来、カーテングラウチングの結果は、ルジオンマップ（ここでは省略）、単位セメント注入量マップ（ここでは省略）、ルジオン値の次数別超過確率図（図-2を参照）、ルジオン値の次数別低減図（図-3を参照）などにとりまとめられてきた。なお、本報文では、図に示すように、便宜上、パイロット孔を0次孔と呼ぶこととする。

これらの図はそれぞれ意味を持つ図であるが、カーテングラウチングの結果をより詳細に分析するには、さらに工夫した図面が必要である。ここでは、このような観点から、色々な解析図を使用して、カーテングラウチングの孔配置の妥当性やカーテングラウチングの効果的な判定方法について検討してみる。

3.2 孔間隔と改良目標値

ここでは、まず、中央内挿法に対する2つの考え方を示す。本来、中央内挿法は、グラウチングの効果を確認するため、12m、6m、3m、1.5mと、順次孔間隔を半分に詰めて、新しいグラウチング孔を施工していくという方法である。この考え方を概念的に示せば、図-4 (a) の矢印のようになる。このような考え方に対して、図-4 (b) の矢

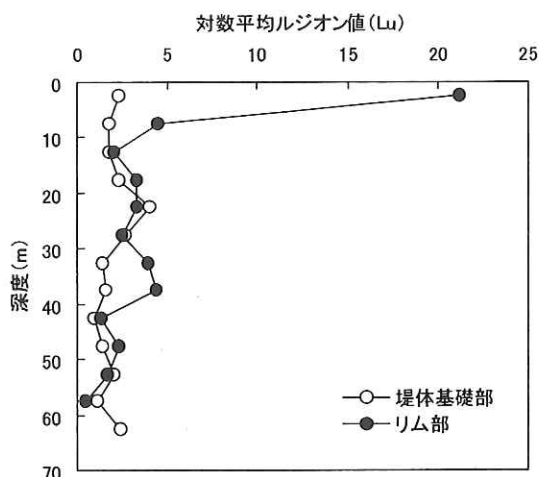


図-1 深度別ルジオン値の分布

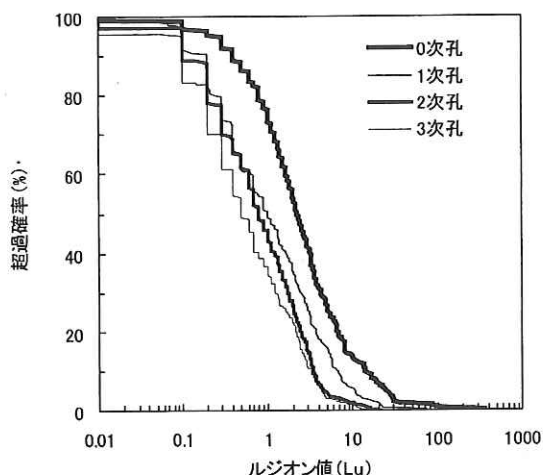


図-2 ルジオン値の次数別超過確率図

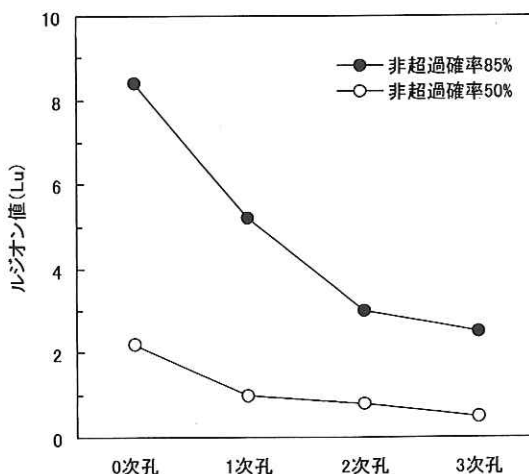


図-3 ルジオン値の次数別低減図

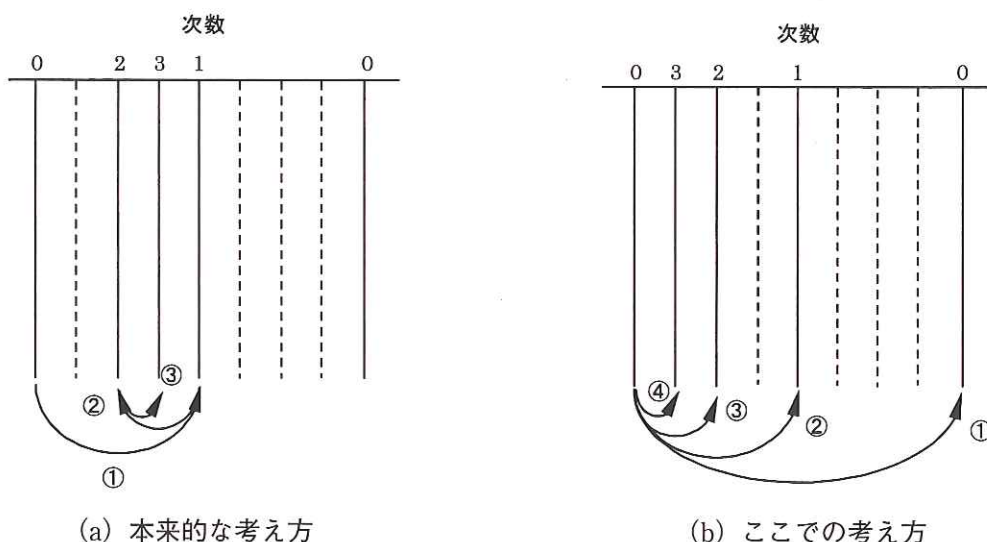


図-4 中央内挿法の考え方

印のような考え方でも成立する。すなわち、当該孔に対して隣接孔の位置を順次近づけていくという考え方である。

このような考え方に立つと、グラウチング結果の解析に新しい発想が生まれる。たとえば、図-3に示したルジオン値の次数別通減図は図-5のように、孔間隔とルジオン値の改良度の関係を表す図に改められる。そして、図にプロットされた点を結んだ曲線がy軸と交わる点(y切片)が改良限界を表していることになる。この図では、50%非超過確率で約0.5Lu、85%非超過確率で約2Luが改良限界ということになる。

カーテングラウチングによる改良目標値は、このy切片より大きくなるように設計されなければならない。そして、所定の遮水性を得るために必要なルジオン値がこの値より大きい場合には、グラウトカーテンの列数を増やし、1列あたりの改良目標値を緩和するなどの措置が必要になる。

なお、図-5において厳密性を問うと、図-4 (a)の3次孔は統計処理の対象外となり、図-4 (b)の3次孔だけを統計処理の対象としなければならない。しかし、本解析では両者の結果はほぼ同じであった。すなわち、図-4 (a)の3次孔を入れても入れなくても、統計結果に有意な差がないことが確認されている。また、思考実験的に考えてみても、そのような答になることが想定される。したがって、これまでに描かれたルジオン値の次数

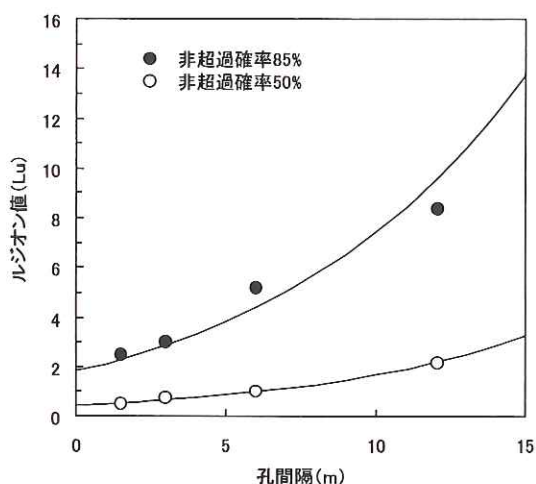


図-5 グラウチング孔の間隔とルジオン値の関係

別低減図をグラウチングの改良限界判定図に変換することは容易である。なお、図-5を描くには最低3点が必要である。そこで、カーテングラウチングの次数は最低でも0次孔、1次孔、2次孔の3段階とするのが妥当であるといえる。

ところで、図-5を見ると、非超過確率50%に対して非超過確率85%の方が曲線の近似度が悪くなっている。これは、非超過確率85%というのは統計的に例外値となる領域を扱っているためである。すなわち、試料のバラツキがその結果に現れることになる。このようなバラツキを消去するには、統計学上の数値である平均値+標準偏差(理

論的には非超過確率84.1%)の値を採用する方がよい。

ところで、ルジオン値の頻度分布形状を調べて見ると、図-6に示すように、一般的にルジオン値の頻度分布は対数正規確率分布で近似できる。このような対数正規分布において、 $\text{平均値} + \text{標準偏差}$ に相当する値は $10^{m+\sigma}$ である(ここに、 m はルジオン値の対数の平均値、 σ はルジオン値の対数の標準偏差である)。そこで、この値を用いて図-5を描き改めると図-7のようになる。この場合、試料のバラツキの影響は解消され、 $\text{平均値} + \text{標準偏差}$ のプロット点と近似曲線はよい一致度を示すことになる。

図-2はグラウチングの施工結果を表した図であるのに対し、図-7は当該岩盤の改良特性を表した図である。そこで、類似の地質を有するダムサイトにおける同図を参考にすれば、グラウチングの改良限界と必要な孔配置が推定できることになる。また、グラウチングの途中段階でこの図を描けば、改良目標値が妥当に設定されているか否かを判断できることになる。

3.3 次数別ルジオン値の変化

次に、0次孔、1次孔、2次孔と次数が増加するに従って、ルジオン値がどのように変化しているのかを調べてみる。そのためには、 N 次孔と $N+1$ 次孔の関係を図化するとよい。

図-8は、ルジオン値の対数の(平均値+標準偏差)について N 次孔と $N+1$ 次孔の関係を示したものである。図によれば、ルジオン値の対数の平均値+標準偏差の次数毎を追った変化は

$$\log Lu_{N+1} - b = a (\log Lu_N - b) \quad (1)$$

のような等比級数で表され、図-8の折れ線に従って順次低減していくことがわかる。そして、その収束点 $\log Lu = b$ が図中の白丸となる。この値はおおむね $2Lu$ となっている。この結果は図-7の結果とよい一致を示している。

3.4 個々の隣接孔のルジオン値の関係

図-7、図-8はグラウチング孔全体に対する評価であったが、次に、さらに詳細に個々のグラウチング孔について、遮水性の改良効果の変化を見える。

ここでも、図-4に関連して2つの見方がある。一つは N 次孔と隣接 $N+1$ 次孔の関係をみるもの

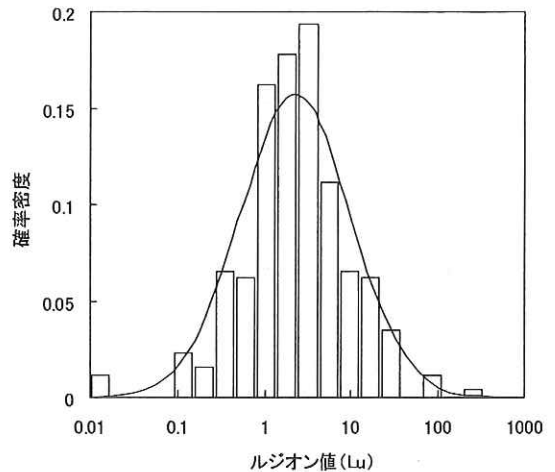


図-6 ルジオン値の頻度分布 (0次孔)

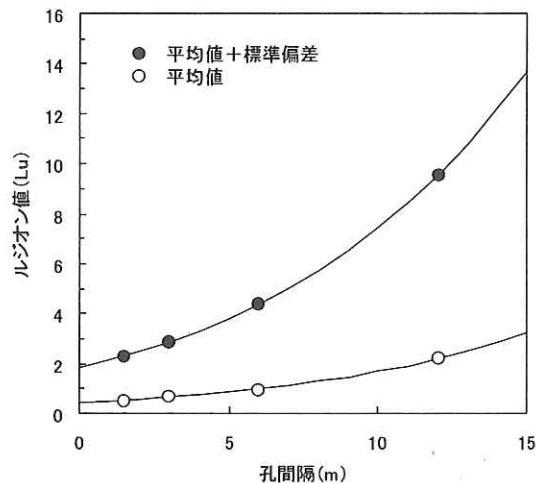


図-7 グ라우チング孔の間隔とルジオン値の関係

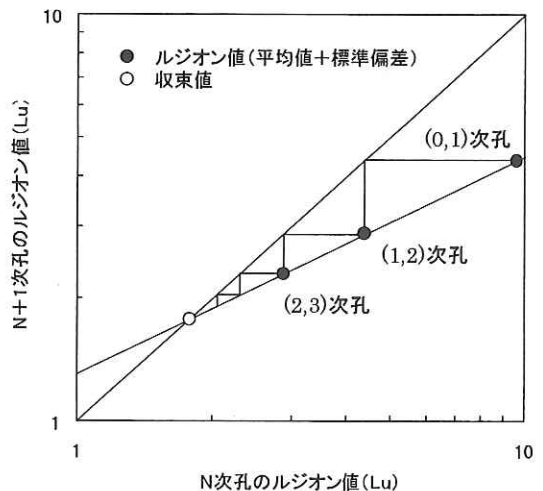


図-8 N 次孔のルジオン値と $N+1$ 次孔のルジオン値の関係

で、図-4 (a) の考え方に立つ整理である。もう一つは0次孔と N 次孔の関係を見るもので、図-4 (b) の考え方に立つ整理である。どちらの整理の方法がよいかは一長一短があるが、改良度を視覚的に見るには、0次孔と N 次孔の関係を見る方がわかりやすい。そこで、この関係を表したものが、図-9 (1) ~ 図-9 (3) である。なお、この場合、図-7と同様に、図-4 (a) の3次孔はプロット点の対象となっていない。

図において45°の斜め線があるが、これより下にプロットされる点は N 次孔のルジオン値が0次孔のルジオン値より小さいことを表す点であり、これより上にプロットされる点は N 次孔のルジオン値が0次孔のルジオン値より大きいことを表す点である。このことは、45°の斜め線より上の点は隣接0次孔の注入の影響範囲にないことを意味している(45°の斜め線より下の点は影響範囲にある場合、または、たまたま低いルジオン値に当たった場合を表す。なぜならば、0次孔のルジオン値と N 次孔のルジオン値が無相関であれば、これらの点は45°の斜め線の両側に同数分布するはずだからである)。図によれば、1次孔から3次孔へと次数が進行するにしたがって、隣接0次孔の注入の影響範囲に入るグラウチング孔が徐々に増加していることが分かる。

この関係を数量的に表した図が図-10である。すなわち、図は図-9 (1) ~ (3) の各点 i の比 $L_{UN}(i) / L_{U0}(i)$ を統計量と考え、その超過確率を表したものである。図-2は、 $L_{UN}(i)$ の超過確率を表しているのに対し、図-10は隣接0次孔との比 $L_{UN}(i) / L_{U0}(i)$ の超過確率を表している。図-2からは改良目標値に対してどこまで改良が進んだかを読み取ることができるが、図-10からは、中央内挿法による孔間の影響がどの程度まで現れているかを読み取ることができる。すなわち、 $L_{UN}(i) \leq L_{U0}(i)$ となる非超過確率は1次孔では72.2% (= 100-27.8)、2次孔では、79.9%、3次孔では84.3%であり、その比率は0次孔の影響範囲に入っている孔の比率を示していることになる(ただし、上述したように、この百分率は50%から始まることに注意する必要がある)。

次に、この値を孔間隔との関係で表したものが図-11である(図の y 切片が100%としなっているのは、自分自身は必ず注入影響下になければなら

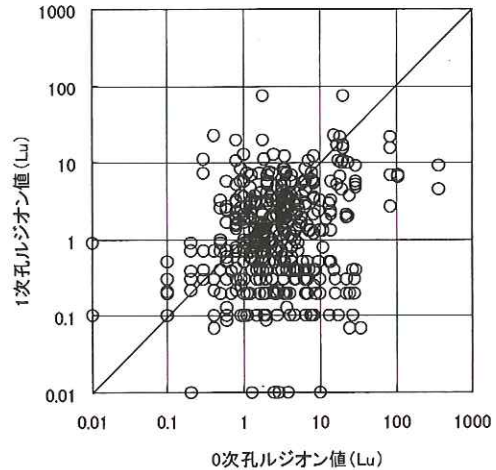


図-9(1) 0次孔のルジオン値と隣接1次孔のルジオン値の関係

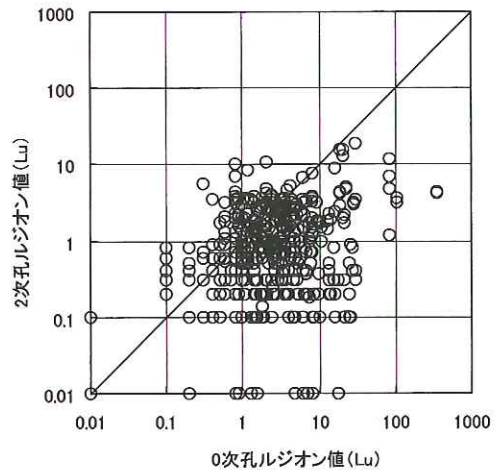


図-9(2) 0次孔のルジオン値と隣接2次孔のルジオン値の関係

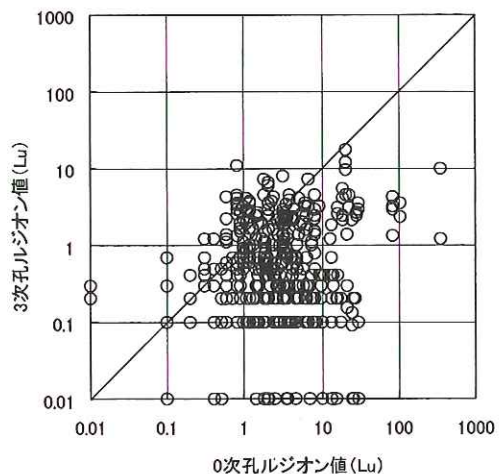


図-9(3) 0次孔のルジオン値と隣接3次孔のルジオン値の関係

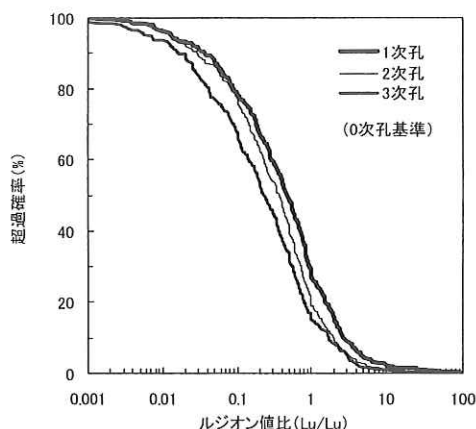


図-10 0次孔を基準とした隣接N次孔のルジオン値の超過確率

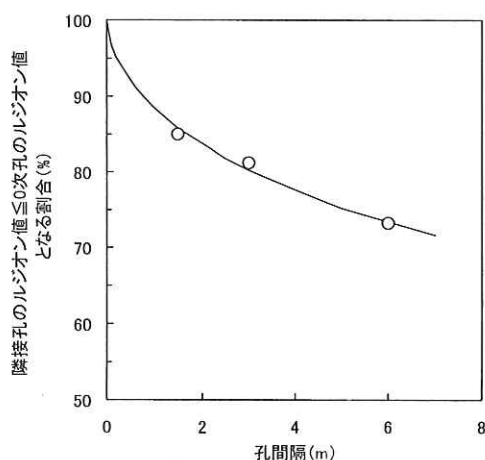


図-11 孔間隔と隣接孔のルジオン値が0次孔のルジオン値以下になる割合

らないためである)。このような図を描くことによって、グラウチング孔の間隔がどの程度であれば、グラウチング孔の影響範囲がどの程度になるかを推定することができる。すなわち、これらの図から、規定孔間隔の妥当性または規定孔間隔変更の必要性を定めることが可能となる。

それでは、規定孔の間隔はこの確率値がいくつになるように定めるべきであろうか。一般的に言えば、図-9の斜め45°の線より下に位置する点の確率を平均値+標準偏差≒85%とするのが妥当と考えられる。しかし、この判断は最終的な判断ではなく、規定孔を打ち切り、追加孔に切り替えるための判断である。したがって、この後、追加孔が施工される訳であり、それほど高い厳格性は要求されない。そこで、筆者は75～80%程度を

考えておけばよいのではないかと考えている。なお、厳密に言えば、この値は追加孔をどのような基準で実施するかに関わるものであり、追加孔の実施基準と一緒に考えていくべきものであろう。

4. おわりに

平成15年度に改訂されたグラウチング技術指針は従来の指針に比べて基準が大きく緩和された。これは、一見、コスト削減を目指すために、安全度を軽視した措置のようにも見えるかもしれない。しかし、今日、経済性を度外視した安全性は通用しなくなっている。つまり、十分な安全性でなく、必要十分な安全性が要求されている。このような認識に立つと、グラウチングが過施工なしに実施されることが求められているわけであり、現場技術者の日々の判断というものが重要になってくる。その際、本報文が何らかの参考になれば幸いである。

参考文献

- 1) 建設省河川局開発課監修：グラウチング技術指針・同解説, 1983.11
- 2) 国土技術研究センター編：グラウチング技術指針・同解説, 2003.4 (現在, 出版準備中)

永山 功*



独立行政法人土木研究所水
工研究グループ長
Isao NAGAYAMA