

(58) 浦河ダムにおけるグラウチングによる岩盤の力学的改良効果に関する検討

Estimation of Grouting Effects on Mechanical Properties of Rock Masses in URAKAWA-DAM

菊地 宏吉*・水戸 義忠*・斉藤 俊和**・上野 真二**・宮本 健也***

Kohkichi KIKUCHI, Yoshitada MITO, Kenya MIYAMOTO, Toshikazu SAITOH, Sinji UENO

The aim of consolidation grouting in dam foundation is to improve permeability and mechanical properties of the foundation near the surface. Generally, the check for improvement on permeability is usually carried out by using the check hole, however, the check for improvement on mechanical properties is not done. Therefore, the improvement on mechanical properties could have not been applied to the mechanical design for foundation. The authors have made an in situ experiment in order to examine the grouting effects on the mechanical properties of rock masses. We obtained that the deformability and the shear strength of rock masses can be improved by grouting.

1. はじめに

グラウチング工法のうち、コンソリデーショングラウチングは重力式、アーチ式ダムなどのコンクリートダムの着岩部を改良する際に必ず実施されている工法である。対象となる岩盤の節理を中心とする割れ目の空隙をグラウトで充填することによって透水性を改良すると同時に、基礎全体を固密化、一体化、均質化し、基礎岩盤の変形性と強度を改良することを目的としている。

コンソリデーショングラウチングによる改良効果の検討は、ルジオン試験によって行われるのが一般的であり、これによって岩盤の透水性が所要の基準に到達しているか否かが確認される。しかしながら、グラウチングが岩盤の力学的性状に及ぼす効果については、これまでに検討が行われた例はある¹⁾²⁾ものの、原位置試験の量的制約から多くのデータが得られておらず、完全な実証には至っていない。

本研究は、グラウチングによる岩盤の力学的改良効果に関するケーススタディの一環として、砂岩頁岩の互層を呈する岩盤における現場実験を通して検討を行ったものである。

2. 試験の方法

2.1 試験の概要

建設中の北海道浦河ダムの減勢工の水平な箇所において、岩盤性状がある程度不良な地点を選定し、表土を取り除いた後に平均厚さ約 250 cm のキャップコンクリートを打設して試験ヤードを作成した。試験ヤードの地

* 正会員 工博 京都大学工学部 資源工学教室 応用地質学講座

** 北海道 室蘭土木現業所 浦河総合ダム事務所

*** 学生会員 京都大学大学院 工学研究科 修士課程

質は白亜紀中部蝦夷層群の砂岩頁岩互層であり、全体的には頁岩が優勢であり、やや軟質である。表面的には概ねC_M～C_L級を呈する岩盤である。試験ヤード上に図-1のように中央内挿法にしたがってボーリング孔(口径66mm)を配置した。

まず、1次孔を削孔した後、ボーリングコア鑑定を行い、引き続き孔内載荷試験、ルジオン試験、グラウチングを順に実施した。その後、2次孔、3次孔、4次孔においても同様の手順で試験およびグラウチングを行った。なお、この段階で得られた孔内載荷試験の値をグラウチング前の値とする。ただし、2次孔のグラウチング前の値は、1次孔におけるグラウチングの影響を受けた値であり、同様に3次孔のグラウチング前の値は、1次孔および2次孔におけるグラウチングの影響、4次孔のグラウチング前の値は、1～3次孔のグラウチングによる影響を受けた値となっている。

次に全ての孔のグラウチング施工後、全孔をリボーリングし、グラウチング前と同一箇所において孔内載荷試験を実施した。ここで得られた物性値をグラウチング後の値とする。

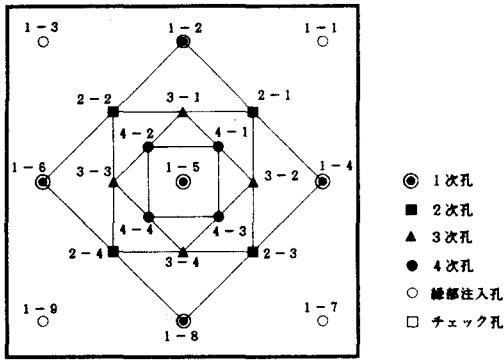


図-1 試験ヤード図

2・2 孔内載荷試験の方法

孔内載荷試験機は、等圧分布載荷方式の機種を用い、各孔において、載荷部(ゴムチューブ)の中心がコンクリート表面から深度450cm、550cm、650cmとなるよう計3箇所において試験を実施した(図-2)。載荷方法は載荷と除荷の間に1分間の持続荷重区間をもうけ、荷重を降伏荷重まで段階的に増加させていくものとし、その載荷速度は5 kgf/cm²/minとした。

試験の結果得られる荷重-変位曲線を用いて、変形係数を処女曲線の包絡線より、静弾性係数(接弾性係数)を最終載荷部の接線の勾配より、それぞれ次式を用いて求めた。

$$D, E = (1 + \nu) \cdot R_m \cdot \frac{\Delta p}{\Delta r} \dots \dots \dots (1)$$

ただし、D、E：変形係数、静弾性係数(kgf/cm²)

ν：ポアソン比

Δp / Δr：荷重～変位曲線の勾配(kgf/cm²/cm)

R_m：勾配を求めた区間の中間の試験孔半径(cm)

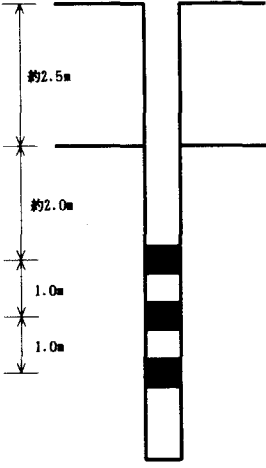


図-2 試験箇所

2・3 グ라우チングの方法

グラウチング前の孔内載荷試験終了後、パッカーを深度2mの地点に設置して、水押し試験をおこない、得られたルジオン値から注入開始濃度を決定し、グラウチングを実施した。注入速度は、20 l/minを上限とし、注入規定圧は、2.0 kgf/cm²とした。規定圧力到達後、注入速度が0.2 l/min/mになってから、30分間のため押しをおこない、その間に注入速度の上昇がない場合を持って、グラウチング終了とした。

3. 試験結果および考察

3.1 変形性の改良効果の検討

図-3 にグラウチング施工前後の変形係数の対数頻度分布を示す。この図よりグラウチング前後で分布が右へ遷移していることがわかる。グラウチング施工前後それぞれについて対数平均値および対数分散を算出すると、グラウチング施工前では平均値が 8354 kgf/cm^2 であり、分散が 0.3527 であるが、グラウチング施工後では平均値が 13411 kgf/cm^2 、分散が 0.3070 となり、全体として岩盤の物性値が上昇し、固密化、一体化、均質化していることがわかる。図には示していないが、静弾性係数についても同様の結果が得られた。

図-4 にグラウチング施工前後に同一地点で得られた変形係数の対応関係を示す。これらの図は、横軸にグラウチング施工前の変形係数を取り、縦軸に同一地点で得られたグラウチング施工後の変形係数をとって、全ての試験結果をプロットしたものである。図より全ての試験実施箇所において変形係数の上昇が認められ、変形性が改良されていることがわかる。またグラウチング施工前の値が小さいほど改良の度合いが大きく、グラウチング前の値が大きいほど改良の度合いが小さいという傾向が認められる。

この傾向をより詳しく調べるためにグラウチング施工前の変形係数を横軸に改良比（グラウチング施工後の値と施工前の値の比）を縦軸にとり、全ての試験結果をプロットしたものが図-5 である。この図よりグラウチング施工前の値が小さいものでは改良度合いが大きく、注入前の値が大きいものに対しては改良度合いが小さいという傾向がはっきりと認められる。これは、初期的に変形性が良好な岩盤ほどグラウトが充填される空隙量が少ないため、グラウチングによる改良効果が低くなったのに対し、初期的に変形性が不良な岩盤ほど空隙量が多いため、グラウチングによる改良効果が高くなったものと推察される。これらの傾向はこれまで筆者らが実施した同様の研究報告³⁾⁴⁾とよく一致するものである。

また、次数別にグラウチング前の変形係数と改良比の関係を示したものが図-6 である。これらの図を見ると1次孔における改良比が2次孔以降の改良比に比べて大きくなっていることがわかる。2次孔以降の改良比が1次孔に比べて小さいのはこれらの孔はそれより前の次数のグラウチングによって既に改良されるべき空隙部分にグラウトが充填されているためと考えられている。これらの傾向は静弾性係数についても同様に認められる。

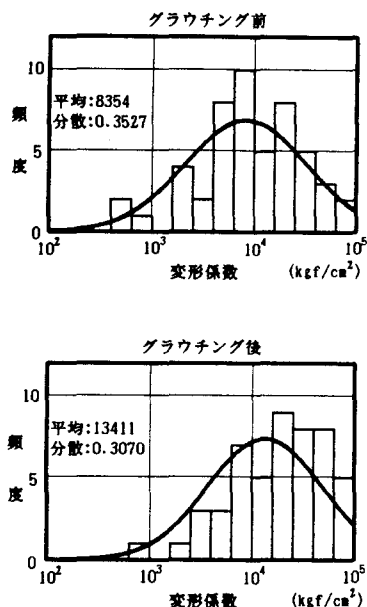


図-3 グ라우チング前後の対数頻度分布

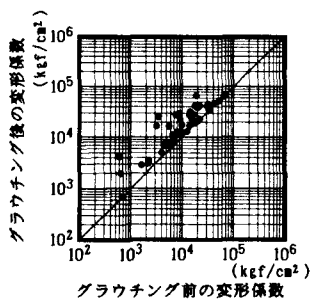


図-4 グラウチング前後の変形係数の関係

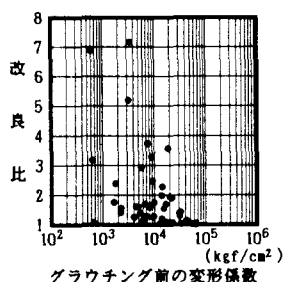


図-5 初期の変形係数と改良比の関係

3・2せん断強度の改良効果の検討

孔内載荷試験より得られる応力-変位関係の直線部分はある応力の大きさに達すると一般に折れ曲がり変位の進行度合いが急に大きくなる。武内は、この降伏点を利用して以下のような強度算出方法を提案している⁹⁾。

力学的特性が同様の岩盤（均質な岩盤）において、深度 z と降伏点応力 P_y の関係より次式における係数 a 、 b を求める。

$$P_y = az + b$$

ここで、
$$A = (\gamma - 1) \frac{\nu}{1 - \nu}$$

ただし、

γ : 単位体積重量、 ν : ポアソン比

とすると、内部摩擦角および粘着力は次式によって与えられる。

$$\phi = \sin^{-1} \left(\frac{a - A}{a + A} \right) \dots \dots \dots (2)$$

$$c = \frac{Ab}{a - A} \tan \phi \dots \dots \dots (3)$$

深度と降伏点応力の関係式の係数を求めるにあたっては、力学的特性が均質な岩盤において採取された多数のデータを基に最小二乗法などを用いて決定する必要がある。均質な岩盤とは、本来は強度特性である粘着力・内部摩擦角が概ね等しい岩盤を意味するものであるが、現実には変形性などのほかの力学的特性が等しいものあるいは深度-降伏点応力関係が直線的に表すことができるものを均質な岩盤として評価せざるを得ないため、今回の検討においては、孔内載荷試験によって得られた変形係数の値の大きさによって均質性の評価を行った。すなわちグラウチング前の初期的な状態において、変形係数が 5000 kgf/cm² 以下のグループ（概ね C L 級岩盤に属する）および変形係数が 5000 kgf/cm² 以上のグループ（概ね C M 級岩盤に属する）についてグラウチング前後の粘着力を求めて検討を行った。また、内部摩擦角についてはあらかじめ原位置試験によって得られた 20 度および 35 度という値に固定して検討を行った。これは、これまで筆者らが行った室内試験の結果⁹⁾の、『内部摩擦角はグラウチング施工前後において変化しない』という結果を基にしたものである。

図-7 はグラウチング前後の降伏点応力の対応関係を示したものである。これより全ての測定可能であった箇所において降伏点応力が上昇しており、岩盤の強度が増加していることがわかる。ただし、その上昇度合いにはばらつきがあり、はっきりとした傾向は認められない。

表-1 は、内部摩擦角を固定して最小二乗法によって深度-降伏点応力の関係を算出した場合

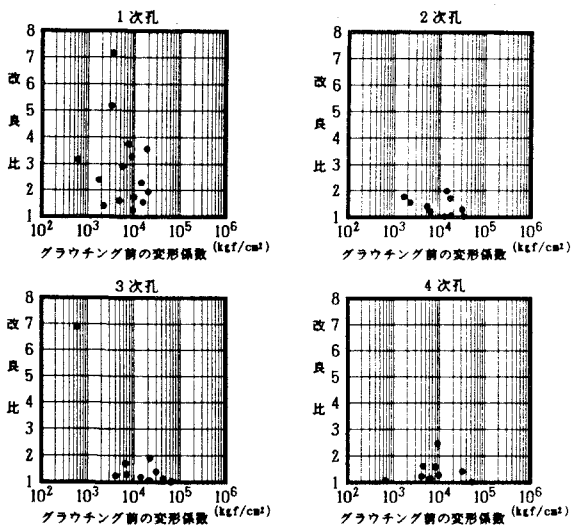


図-6 次数別の初期の変形係数と改良比の対応関係

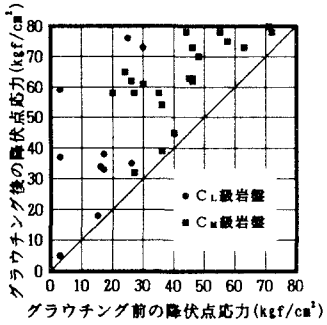


図-7 グ라우チング前後の降伏点応力の関係

表-1 グ라우チング前後の強度値

C _L 級岩盤	粘着力 (kgf/cm ²)	内部摩擦角 (deg)
グラウチング前	2.970	20
グラウチング後	7.790	20

C _M 級岩盤	粘着力 (kgf/cm ²)	内部摩擦角 (deg)
グラウチング前	11.37	35
グラウチング後	16.37	35

のそれぞれの岩級における粘着力である。グラウチング前後でCL級岩盤グループにおいては 4.8 kgf/cm^2 、CM級岩盤グループにおいては 5.0 kgf/cm^2 の粘着力の改良効果が認められた。

3.3 節理部の改良の検討

3.1において、岩盤の変形性について検討を行い、岩盤内の空隙部にグラウトが充填されるであろうことが推測された。ここでは、その空隙部の改良についてより詳しく検討をおこなう。

岩盤内に存在する割れ目がグラウトで充填されているかを知るための一つの指標として E/D 比を考える。 E/D 比とは、静弾性係数を変形係数で除した値である。静弾性係数は、岩盤の岩質部分の影響を大きく受けるのに対し、変形係数は、割れ目を含んだ岩盤全体の影響を大きく受ける物性値である。図-8は、グラウチング前後の E/D 比の関係を示した図である。この図より、グラウチング前に比べてグラウチング後では、概ね E/D 比が減少していることがわかる。したがって、グラウチングによって岩

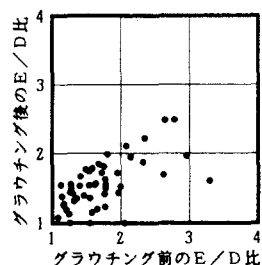


図-8 グ라우チング前後の E/D 比の関係

盤内の割れ目部分がセメントで充填され、岩盤が均質化されたということがわかる。グラウチング前後で E/D 比が減少することは、変形係数が静弾性係数に近づき、岩盤がより弾性体に近づいていることを示している。すなわち、 E/D 比の減少は、割れ目にグラウトが充填されたことを示すものである。また、グラウチング前の E/D 比が大きいものほどグラウトが進入しやすいと考えられ、改良効果が大きくなっている。

4. まとめ

- I 孔内載荷試験によって得られた変形係数について対数頻度分布をとり、グラウチング前後において分散を算出したところ分散が減少し、岩盤が固密化、均質化しており、また、全ての計測箇所に変形係数ならびに静弾性係数が増加して、岩盤性状が初期的に不良なものほどその改良の度合いが高く、初期的に良好なものは不良なものと比較して改良の効果は低いことが判明した。
- II 孔内載荷試験によって得られる岩盤の降伏点応力よりグラウチング前後の岩盤のせん断強度を検討したところ、粘着力に顕著な改良効果が認められ、約 5.0 kgf/cm^2 の粘着力の上昇が認められた。
- III グ라우チングによる岩盤の改良は、主に節理を始めとする割れ目部分に対する改良であると考えられることが判明した。

5. 参考文献

- 1) 飯田隆一：土木工学における岩盤力学概説、彰国社、p.102~103,1978
- 2) 増田秀夫：わが国におけるコンクリートダム基礎岩盤の弾性波速度に関する応用物理学的研究、北海道大学学位論文、1962
- 3) 菊地宏吉他：グラウチングによる岩盤の変形性の改良効果に関する現場実験、第9回岩の力学国内シンポジウム講演論文集、pp.557~562,1994
- 4) 菊地宏吉他：グラウチングによる岩盤の変形性の改良効果に関する評価、第26回岩盤力学に関するシンポジウム講演論文集、pp.26~30、1995
- 5) 武内俊昭他：孔内載荷試験による原位置岩盤の測定について、第6回岩の力学国内シンポジウム、岩の力学連合会、1984
- 6) 水戸義忠他：グラウチングによる節理のせん断強度の改良効果に関する基礎的研究、ダム工学会誌、11月号、1995