

(6) グ라우チングによる岩盤変形性の 改良効果に関する評価

京都大学工学部	正会員	菊地	宏吉
京都大学工学部	正会員	水戸	義忠
京都大学大学院	学生会員	○宮本	健也
建設省	正会員	足立	敏之

Estimation of Grouting Effects on Deformability of Rock Masses

Kokichi KIKUCHI, Kyoto University
Yoshitada MITO, Kyoto University
Kenya MIYAMOTO, Kyoto University
Toshiyuki ADACHI, Ministry of Construction

Abstract

The aim of consolidation grouting in dam foundation is to improve permability and mechanical properties of the foundation near the surface. Generally, the check for improvement on permability is usually carried out by using the check hole, however, the check for improvement on mechanical propeties is not done. Therefore, the improvement on deformability 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 deformability of rock masses. As the results, the followings were obtained;

1. The deformability of rock masses can be improved by groutinnng.
2. More deformable before groting , higher improvement can be expected.
3. The rheological model is suggested in order to examine grouting effects.

1. はじめに

グラウチングは、従来よりダム基礎処理工法として広く用いられてきており、現在まで多くの施工実績を上げてきた工法である。グラウチング工法のうち、本論文で取り扱うコンソリデーショングラウチングは重力式または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。

従来より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少なく、不明な点が多い。したがって、力学的改良効果は基礎岩盤の設計に見込まれることはなく、基礎岩盤の力学的安定性において安全側に作用する効果として評価されるにとどまっている。

現在までに、グラウチングによって岩盤の変形性が改良されることを示した研究例はある^{1) 2)}ものの、原位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。このため、本研究においては、グラウチングによる岩盤の変形性の改良効果について、硬質火山礫凝灰岩における現場実験を

通して検討を行う。

2. 試験の方法

(1) 試験の概要

宮ヶ瀬ダムの右岸上流部EL290m（ダム敷ではない）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厚さ約50cm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。試験ヤード上に図-1のように中央内挿法に従ってボーリング孔（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及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。但し、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次孔及び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。

次に全ての孔についてグラウチングを施工した後、全ての孔をリボーリングし、グラウチング前と同一地点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。

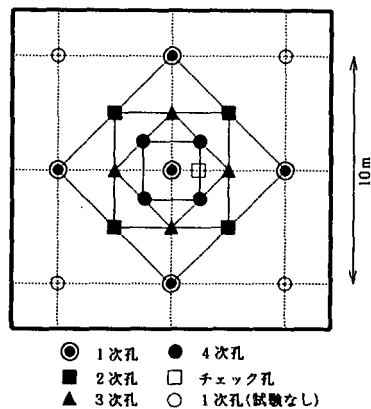


図-1 孔配置図

(2) 孔内載荷試験の方法

孔内載荷試験機は、等圧分布載荷法の機種を用い、各孔において、載荷部（ゴムチューブ）の中心が深度150cm、250cm、350cm となるような計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5kgf/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、接線弾性係数（静弾性係数）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。

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

- 但し、 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)

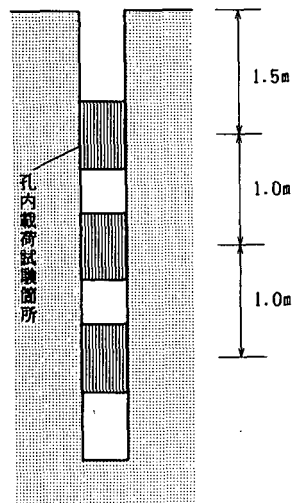


図-2 孔内載荷試験地点

(3) グ라우チングの方法

宮ヶ瀬ダムグラウチング注入規定に従い、以下のような方法に基づいてグラウチングを実施した。

a) 注入材料、および注入開始濃度と切替基準

セメントは高炉セメントB種を用いた。ルジオン試験によって得られるルジオン値から、注入開始濃度を決定し、順次配合を切り換えるものとした。各配合の規定量を注入した段階で、注入量が3 l/min/st以下の場合は配合切り換えは行わず、同一配合で注入を続行した。

b) 注入規制、および注入完了

注入速度は、4 l/min/mを上限とし、注入圧力は3 kgf/cm²を上限とし、水押し試験時に限界圧力に達した場合には、注入圧力=限界圧力+0.5(kgf/cm²)とした。規定注入圧において注入量が1 l/min/m以下の状態が30分以上継続した場合終了とした。

3. 試験結果および考察

(1) 試験結果の検討

図-3、図-4にグラウチング施工前後の変形係数、接線弾性係数の頻度分布を示す。それぞれの分布図内には平均値を示す線を入れている。変形係数については、グラウチング施工前では分布の範囲が概ね10000kgf/cm²以下であるが、グラウチング施工後ではその範囲が5000～15000kgf/cm²となり、全体的に分布が右の方へと移動している。また平均値を見ても5640 kgf/cm² から10897kgf/cm²と値が高くなっており、変形性が改良されていることがわかる。接線弾性係数についても同様の改良効果が認められ、平均値も9058kgf/cm² から17574kgf/cm²に改良されている。

図-5、図-6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、接線弾性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各物性値をと

り、縦軸に同一地点で得られたグラウチング施工後の各物性値をとって、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各物性値の上昇が認められ、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物性値が小さいほど改良の度合いが大きく、グラウチング前の物性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各物性値を横軸に改良比（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-7、図-8である。これら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

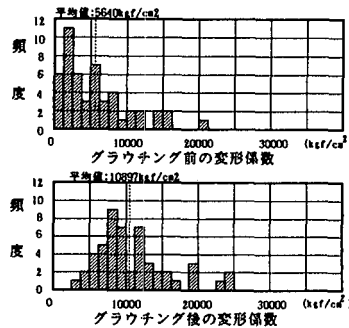


図-3 変形係数の頻度分布

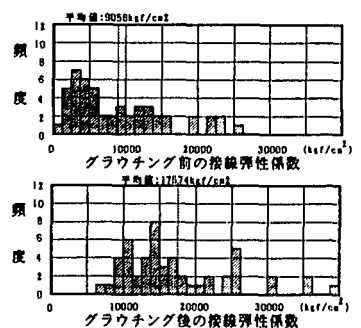


図-4 接線弾性係数の頻度分布

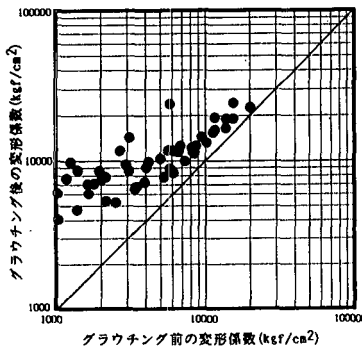


図-5 グ라우チング前後の変形係数の関係

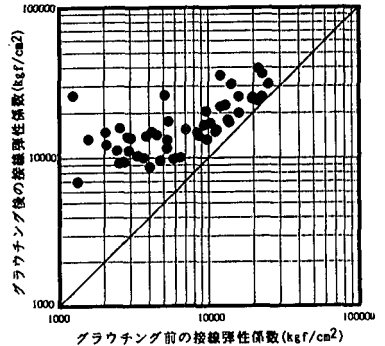


図-6 グ라우チング前後の接線弾性係数の関係

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。

表-1 に各物性値の次数毎の改良比の平均値を示す。この表から1次孔における改良比は2次孔以降の改良比と比較して大きな値をとっていることがわかる。これは2次孔以降の孔は、それより次数の低いグラウチングの影響でグラウチング前にある程度改良がなされている(表-2 参照)ため、改良比では小さくなったものと考えられる。

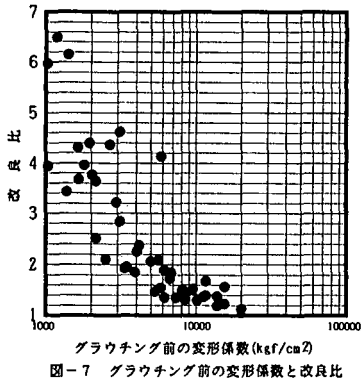


図-7 グ라우チング前の変形係数と改良比

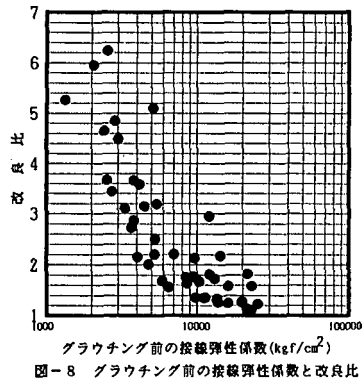


図-8 グ라우チング前の変形係数と改良比

表-1 次数毎の平均改良比

変形係数		接線弾性係数	
次数	改良比	次数	改良比
1次孔	2.323	1次孔	2.241
2次孔	1.765	2次孔	1.833
3次孔	1.781	3次孔	1.999
4次孔	1.981	4次孔	1.775

表-2 次数毎の平均弾性係数(kgf/cm²)

次数	変形係数	次数	接線弾性係数
1次孔	3970	1次孔	6820
2次孔	5988	2次孔	8339
3次孔	6776	3次孔	9630
4次孔	6098	4次孔	10817

(2) 力学モデルによる検討

岩盤の変形は、岩質部分の変形と節理を主とする割れ目の開口・閉合による変形の和と考えられている。ここでは図-9のような岩質部および節理の変形をバネの変形に置き換えた簡単な岩盤モデルを考える。

岩質部(インタクトロック)の弾性係数を E_R 、1つの節理の垂直剛性を k_n とし、節理密度(単位長さあたりに存在する節理の個数)を I とすると、グラウチング施工前の岩盤の弾性係数 E_B は次式のように与えられる⁵⁾。

$$\frac{1}{E_B} = \frac{1}{E_R} + \frac{I}{k_n} \dots\dots\dots (2)$$

同様に、グラウチング施工後の岩盤のモデルとして、図-10に示すようなモデルを提案する。これは節理部分のバネ全体と並列になるように、グラウトが節理部分の変形性に対して与える改良効果のバネを連結したものである。すなわち、グラウトが節理の変形性に対して与える改良効果は、個々の節理に作用するものではなく、節理系全体に作用すると考えるものである。

グラウトが節理系の変形性に対して与える改良効果の弾性係数を E_g とすると、グ

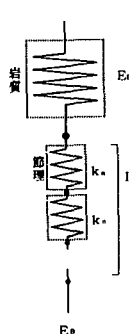


図-9 グ라우チング前の岩盤のモデル

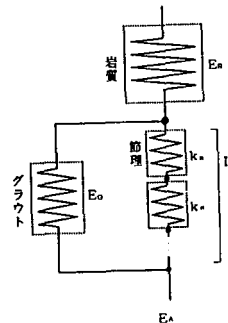


図-10 グ라우チング後の岩盤のモデル

ラウチング施工後の岩盤の弾性係数 E_A は次式で表される。

$$\frac{1}{E_A} = \frac{1}{E_R} + \frac{1}{k_n / I + E_G} \quad \dots\dots(3)$$

(2)、(3)式より、 k_n / I を媒介変数として E_B と E_A の関係を示したものが図-11、 E_B と改良比の関係を示したものが図-12である。ここで E_G に関しては未知数であり、試験結果より求められた変形係数の値を基に最小二乗近似によって推定を行った(約5000kgf/cm²)。

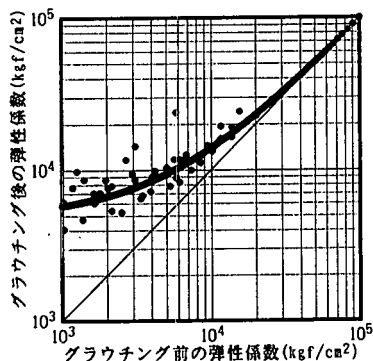


図-11 モデルより得られるグラウチング前後の弾性係数の関係

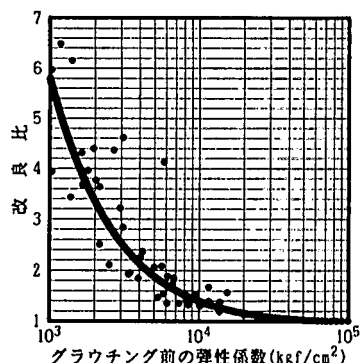


図-12 モデルより得られるグラウチング前の弾性係数と改良比の関係

図-11、図-12をみると、実際に測定によって得られた結果と(2)、(3)式より得られた結果は岩盤の良否に関わらずよく対応

していることがわかる。このことは、グラウチングにより岩盤内の節理部分が力学的に改良されるというメカニズムを示していると考えられ、上記の試験結果より得られた結論を一部実証するものであると思われる。

4. まとめ

本研究では、硬質凝灰角礫岩において、グラウチング前後で孔内載荷試験を実施し、直接的に岩盤の力学的物性値を多数測定することによってグラウチングによる力学的改良効果の検討を行った。本研究で得られた結論は以下の通りである。

- I 孔内載荷試験によってグラウチング前後の岩盤の変形性を調べたところ、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いることが確認された。
- II グ라우チングによる岩盤の変形性の改良効果は、岩盤性状が初期的に不良なものほど高く、良好なものほど不良なものと比較して低いことが判明した。
- III グ라우チングによる岩盤の変形性の改良効果を組み入れた力学モデルを作成したところ、実測結果と非常に良い対応がみられ、グラウチングにより岩盤内の節理部が改良されるというメカニズムがある程度実証されたものとする。

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、水戸義忠、小柳聡、鈴木英也：グラウチングの改良効果に関する現場実験とその検討—流紋岩に関する検討—、第25回岩盤力学に関するシンポジウム講演論文集、pp.436~440, 1993
- 4) 菊地宏吉、水戸義忠、井出康郎、中弘幸、吉野尚人：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
- 5) R.E. グッドマン(大西有三、谷本親伯訳)：わかりやすい岩盤力学、鹿島出版会、p.135, 1984