

グラウチングによる花崗岩岩盤の力学的改良効果に関する現場実験の研究 (比奈知ダム・山口調整池における検討)

IN SITU EXPERIMENTS ON MECHANICAL EFFECTS BY GROUTING IN GRANITES
(HINACHI DAM AND YAMAGUCHI REGULATING RESERVOIR)

双木英人*・西林道彦**・菊地宏吉***・水戸義忠****

Hideto NAMIKI, Michihiko NISHIBAYASHI, Kohkichi KIKUCHI and Yoshitada MITO

The authors have carried out an in situ experiment in the foundations of Hinachi dam (concrete gravity type dam) and Yamaguchi Regulating Reservoir (rock fill type dam), which are composed of Cretaceous granites, in order to examine the grouting effects on deformability of granitic rock masses. As the results, it is clarified that deformability of rock masses can be improved by grouting as well as permeability.

1. 緒言

グラウチング工法は、ダム建設分野で広く用いられている工法であり、岩盤内に存在する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岩盤の透水性を改良すると同時に、基礎岩盤全体を「固密化」、「均質化」、「一体化」（基礎岩盤をダムからの作用力に対し岩盤を一体的に挙動させる）するものと考えることができる。

従来より、グラウチングによる岩盤改良においては、透水性の改良に主眼がおかれており、力学的改良効果については不明な点が多かった。近年、菊地、水戸他によって、グラウチングによる力学的改良効果に関する原位置試験結果¹⁾²⁾³⁾⁴⁾⁵⁾および室内実験結果⁶⁾が報告され、グラウチングによって実際に岩盤の変形性および強度が改良されていることが示されてきた。

そこで、本研究においては力学的特性のうち変形性に論を絞り、ケーススタディの一環として、花崗岩で構成される水資源開発公団比奈知ダム（重力式コンクリートダム）ならびに山口調整池のロックフィルダム基礎岩盤で現場実験を行い、その改良度合いの検討を行った。

2. 原位置試験

現在建設中である水資源開発公団比奈知ダム（重力式コンクリートダム）のカーテングラウチング孔の3孔ならびに山口調整池のロックフィルダムのカーテングラウチング孔の2孔を対象として原位置試験を実施した。ここでは、試験地点の概要、試験の内容について述べる。

* 正会員 工修 水資源開発公団試験研究所主任研究員

** 正会員 工修 水資源開発公団試験研究所

*** 正会員 工博 京都大学大学院教授 工学研究科資源工学専攻

**** 正会員 工博 京都大学大学院助手 工学研究科資源工学専攻

2.1 試験地点

比奈知ダムは水資源開発公団が淀川総合開発の一環として淀川水系木津川支川名張川に建設中の多目的ダムであり、総貯水容量は約 2,100 万 m^3 である。重力式コンクリートダムが築造され、その諸元は、堤高 70.5 m、堤頂長 355 m、堤体積 410,000 m^3 である。基礎を構成する地質は中生代白亜紀の領家複合岩体の花崗岩および片麻岩であり、今回の試験地点が位置する河床部周辺は新鮮堅硬な花崗岩類より構成されている。本研究においては、ダム軸に位置する監査廊より鉛直下向きに施工されるカーテングラウチング孔のうち、河床部に位置する 3 孔を利用して試験を実施した。本ダムのカーテングラウチングはステージ長が 5 m のシングルパッカー方式で施工されているが、今回の試験の対象とした深度は、3 孔ともに岩着面から 0～10 m の範囲、すなわち第 1・2 ステージに該当する範囲とした。また、この範囲の岩盤性状は C_H 級を呈している。

一方、山口調整池は、水資源開発公団が福岡導水事業の一環として筑紫野市大字山口地内に建設するものであり、総貯水容量は約 400 万 m^3 である。中央遮水ゾーン型ロックフィルダムが建設中であり、その諸元は、堤高 60 m、堤頂長 326 m、堤体積 1,060,000 m^3 である。基礎を構成する地質は中生代白亜紀の糸島花崗岩類および早良花崗岩類であり、今回の試験地点が位置する河床部周辺は糸島花崗岩類より構成されている。この部分における糸島花崗岩類は、花崗閃緑岩中に断層に沿って貫入している優白色花崗岩が主体であり、その鉱物組成は、石英・長石に富み、有色鉱物の含有が少ないことで特長付けすることができる。また、白色の熱水変質脈を伴う部分が多く認められ、やや軟質な岩盤性状となっている。本研究においては、ダム軸に位置する監査廊より鉛直下向きに施工されるカーテングラウチング孔のうち、河床部に位置する 2 孔を利用して試験を実施した。本ダムのカーテングラウチングはステージ長が 5 m のシングルパッカー方式で施工されているが、今回の試験の対象とした深度は、カーテングラウチングに先行して実施されたブランケットグラウチングの影響を受けている可能性が高い第 1 ステージを回避し、2 孔ともに口元から 5～20 m の範囲、すなわち第 2・3・4 ステージに該当する範囲とした。また、この範囲の岩盤性状は概ね CM 級を呈している。

なお、周知のようにカーテングラウチングは岩盤の力学的改良を意図するものではないが、ここでは、グラウトが岩盤内の空隙に充填することによって岩盤が力学的に改良されるという現象はカーテングラウチングにおいても変わりはない（特に今回試験を実施した表層付近では注入圧もコンソリデーショングラウチングと同程度である）という考えのもとに検討を行った。

2.2 試験の内容

孔内における試験は、グラウト注入ステージごとに以下のような手順にしたがって実施した。

a) ボーリング及びコア採取率の算定

径 66mm のロータリー方式で所定のステージ長をコアボーリング（コアバックチューブ使用）し、コア採取率を算定した。なお、ここでいうコア採取率とは、土状の非固結部分を除いた、円柱状の形状を保って固結しているコアが全体に占める割合を意味する。

b) 孔内載荷試験

各ステージの上端を基準として深度 0.5 m、1.5 m、2.5 m、3.5 m の点を載荷中心とし、孔内載荷試験を実施した。使用した孔内載荷試験機は等分布載荷方式の機種であり、載荷長は 52cm である。載荷方法は載荷と除荷の間に 1 分間の持続荷重区間を設け、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 $\text{kgf/cm}^2/\text{min}$ を基本とした。試験の結果得られる荷重強度－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（接線弾性係数）を最終載荷曲線の接線の勾配より求めた。

c) 水押し試験・グラウチング

各ダムのカーテングラウチング施工基準に則って、水押し試験およびグラウチングを実施した。なお、水押し試験によって得られたルジオン値は、比奈知ダムにおいて概ね 4 Lu 以下（10Lu 程度が 1 区間存在する）、山口調整池において 2.5Lu 以下であり、比較的低い透水性状を呈している。また、グラウチングにおける単位セメント注入量は、比奈知ダムにおいて概ね 15 kg/m 以下（100 kg/m が 1 区間存在する）、山口調整池で 5～15 kg/m の範囲内である。

d) グラウチング後の試験

グラウチング終了から6～8時間の硬化待ちを経た後、径66mmのロータリー方式でリボーリングを実施した。このリボーリング孔において、グラウチング前と同一箇所でも再び孔内打撃応答試験および孔内載荷試験を実施し、打撃応答量ならびに変形係数および静弾性係数を求めた。

3. 試験結果および考察

3.1 岩盤の固密化に関する検討

図-1 にグラウチング前後の変形係数の頻度分布およびグラウチング前後の静弾性係数の頻度分布を示す。変形係数・静弾性係数ともに、グラウチング前後で平均値が上昇していること、ならびに分布範囲が上昇していることから、変形性が改良されていることがわかる。特にこの傾向は変形係数の方が顕著である。図-2 にグラウチング前後において同一地点で得られた変形係数、静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前の各物性値、縦軸に同一地点で得られたグラウチング後の各物性値をとり、全ての試験結果をプロットしたものである。図をみると、ほとんどの試験実施箇所において変形係数・静弾性係数の上昇が認められ、個々の地点においても変形性が改良されていることがわかる。また、全般的な改良度合いは変形係数の方が高いものと考えられる。

以上の検討により、グラウチングによって岩盤が「固密化」されていることがわかる。

3.2 岩盤の均質化に関する検討

図-1 をみると、グラウチング前後において、変形係数および静弾性係数の分布範囲が狭まっており、グラウチングにより変形性のバラツキが減少する傾向が認められる。また、図-2 をみると、グラウチング前の物性値が低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高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前の各物性値を横軸に改良比（グラウチング後の値とグラウチング前の値の比）を縦軸にとり、全ての試験結果をプロットしたものが、図-3 である。これらの図よりグラウチング前の値

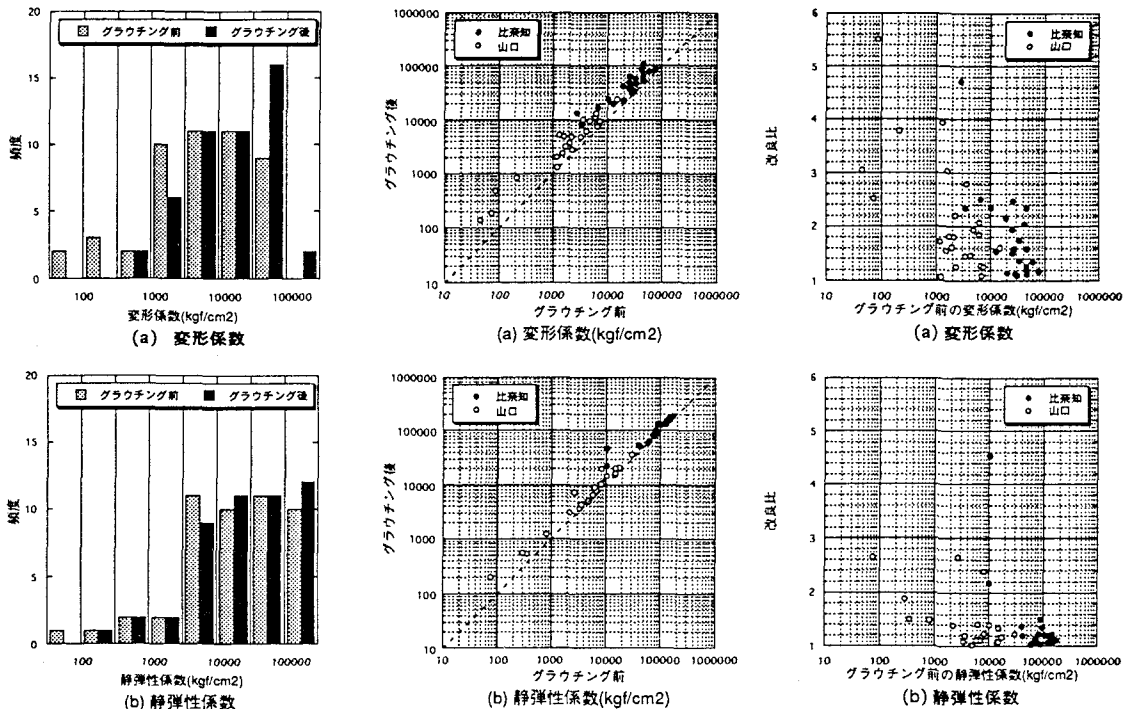


図-1 改良前後の変形性の頻度

図-2 改良前後の変形性の関係

図-3 改良前の変形性と改良比

が低いものでは改良度合いが大きく、グラウティング前の値が高いものに対しては改良度合いが小さいという関係が明確に認められる。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（割れ目の開口部などの空隙）が少ないため、グラウティ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、グラウティングによる改良効果が高くなったものと推察される。

ここで、この現象について、コア採取率という観点から考察する。図-4 はコア採取率とグラウティング前（初期状態）の変形係数および静弾性係数の関係である。この図を見ると、コア採取率が低いほど初期的な変形性の値が低く、高いものほど初期的な変形性の値が高いという傾向が認められる。図-5 にコア採取率に対する変形係数および静弾性係数のグラウティング前後の改良比の関係を示す。この図からは、コア採取率が低いものほど変形性の改良効果が高いことがわかる。これらのことから、変形性の改良効果と岩盤の初期的な空隙量との間には相関性があり、この現象が岩盤の均質化に寄与しているものと推察される。

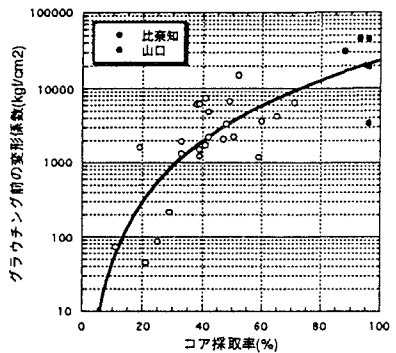
以上の検討により、グラウティングによって岩盤が「均質化」されていることがわかる。

3.3 岩盤の一体化に関する検討

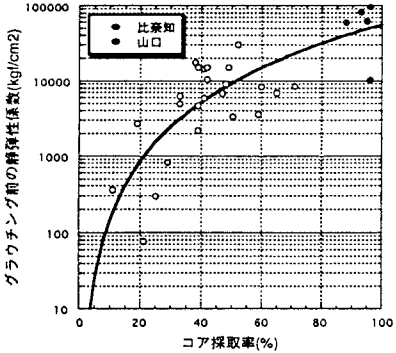
岩盤が一体化するということは、岩盤を分離する節理を主体とする不連続面等の空隙部が改良され、ここに起因する物理量のギャップが減少することによって、岩盤が連続体に近づくことである。

一般に、変形係数が節理などの不連続面等の空隙部を含む岩盤全体の変形性を反映する値であるのに対し、静弾性係数はインタクトな部分の変形性を反映しやすい値であることが知られている。したがって、これらの比である E/D 比（静弾性係数／変形係数）は岩盤の物性における不連続面等の空隙部の影響度合いを示す値である。

図-6 はグラウティング前後の E/D 比を示したものであり、グラウティング前の値と比較してグラウティング後の値が減少していることがわかる。すなわち、グラウティングにより岩盤の物性における不連続面等の空隙部の影響度合いが減少しているものと考えられ、このことから空隙部分が改良されていることが推察される。

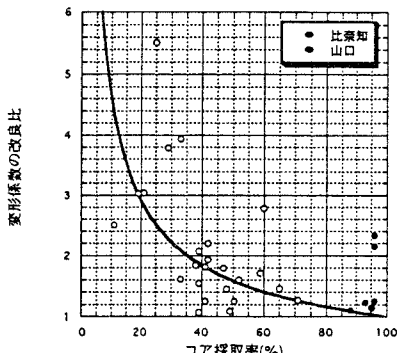


(a) 変形係数

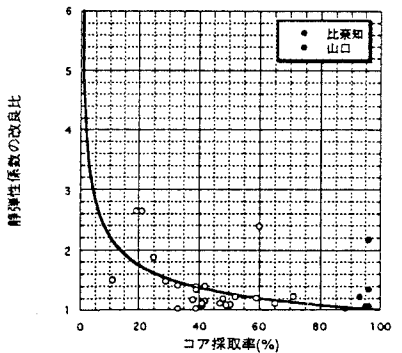


(b) 静弾性係数

図-4 コア採取率と改良前の変形性



(a) 変形係数



(b) 静弾性係数

図-5 コア採取率と改良比

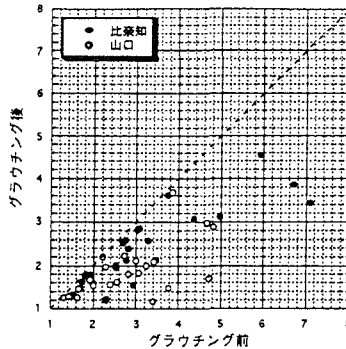


図-6 改良前後のE/D比

4. 結論

本研究では、グラウティングによる力学的改良効果に関するケーススタディーの一環として、堅硬な花崗岩で構成される比奈知ダム河床部のカーテングラウティング孔ならびにやや変質した花崗岩で構成される山口調整池ロックフィルダム河床部のカーテングラウティング孔を用いて、グラウティング前後で原位置の力学試験を実施し、検討を行った。本研究の結果得られた結論は以下のとおりである。

- (1) グラウティング前後で変形係数および静弾性係数の値が上昇することから、グラウティングによって岩盤が固密化していることが判明した。また、静弾性係数と比較して変形係数の方が改良度合いが高い。
- (2) グラウティング前後で変形係数および静弾性係数の分布範囲が狭まり、岩盤が均質化していることが判明した。これは、グラウティング前の値が低い（初期的に岩盤内に空隙が多い）ものほど改良度合いが大きく、グラウティング前の値が高い（初期的に岩盤内に空隙が少ない）ものほど改良度合いが小さいことに起因するものと考えられる。
- (3) グラウティング前後でE/D比（静弾性係数／変形係数）が減少していることから、岩盤内の空隙部分が改良されていること、すなわち、岩盤が一体化していることが判明した。

今後も、グラウティング前後の岩盤の力学的改良効果に関する情報の 積を行っていく所存である。

5. 参考文献

- 1) 菊地宏吉、水戸義忠、小柳聡、鈴木英也：グラウティングの改良効果に関する現場実験とその検討ー流紋岩に関する検討ー、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.
- 2) 菊地宏吉、水戸義忠、足立敏之、箱石憲昭：グラウティングによる岩盤の力学的改良効果に関する現場実験的研究、土木学会論文集 No.517,pp.117-125,1995.
- 3) 菊地宏吉、水戸義忠、七澤 馨、高橋義春、宮本健也：孔内載荷試験機を用いたグラウティングによる力学的改良効果の検討ー砂岩・頁岩互層を対象としてー、ダム工学No.21,pp.44-52,1996.
- 4) 菊地宏吉、水戸義忠、斉藤俊和、上野真二、宮本健也：浦河ダムにおけるグラウティングによる力学的改良効果の検討、ダム日本No.616, pp.21-27,1996.
- 5) 菊地宏吉、水戸義忠、井出康郎、中弘幸、吉野尚人：グラウティ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.
- 6) 水戸義忠、菊地宏吉、若林成樹、平野 勇：グラウティ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No.19,pp.16-28,1995.
- 7) 菊地宏吉、水戸義忠、宇津木慎司：孔内打撃応答試験機の適用性に関する検討、応用地質第36巻第1号、pp.14-23,1995.