

(3) 節理性岩盤におけるグラウチングの充填メカニズムに関する基礎的研究

京都大学 ○吉川浩二
京都大学 水戸義忠
京都大学 菊地宏吉
京都大学 神田耕治
三井建設(株) 山田文孝

Fundamental Study on the Filling Mechanism of Grouting in Jointed Rock Mass

by

Koji Kikkawa, Yoshitada Mito
Koukichi Kikuchi
(Kyoto University Faculty of Engineering)
Humitaka Yamada
(Mitsui Construction)

ABSTRACT

The grouting technique is chiefly executed for the purpose of improving structure foundation properties, but the behaviour of the grout milk in cracks has been unknown yet. Therefore, it is difficult to forecast, control and plan the grouting work effectively. The authors studied the mechanism of grouting. We carried out the grouting test and simulated it.

1. はじめに

硬質塊状岩盤を基礎とするダム等の構造物の基礎処理工法としては主にグラウチング工法が適用されるが、それは割れ目にグラウト剤を注入して間隙を充填することを目的とするものである。

しかし割れ目内のグラウトミルクの挙動が未だによく知られていないため、グラウチングの予測、制御が困難で、合理的な計画を立てることが難しいのが実状である。

そこで本論文ではセメントグラウトによる割れ目の目詰まりに関する考察を行った。割れ目の目詰まりは、セメント粒子が割れ目を閉塞、充填することにより水の流れを遮断することと定義することができる。従って著者等はまずセメント粒子の閉塞過程を3種類の要因(吸着作用・沈降作用・凝結時間)に従って分類を試みた。これに基づいてグラウチングメカニズムをモデル化し、現場において実施した岩盤ブロックのグラウチング実験についてシミュレートした。

2. グ라우チングの問題点

グラウチングを実施する際には、通常ルジオン試験や水押し試験によって限界圧力とルジオン値を決定し、

その値を参考にして注入効率を高めるように注入圧力、グラウト濃度が決定される。注入圧力は地表に近い箇所においては低く、深部では高く設定されることが多い。また施工初期段階においてはグラウト濃度（水、セメントの配合比）の薄いものを用い、その後段階的に濃いものに切り替えていくことが多い。

このように実際のグラウティング工では岩盤の性状が多種多様である上に注入圧力やグラウト濃度が複雑に組み合わさっているため、グラウト注入から充填・固結に至る現象を把握する事が非常に難しい。それ故グラウティングの予測、制御が困難で、適切な計画を立てるための理論的な根拠が確立されていないのである。

3. 岩盤ブロックにおけるグラウティング施工実験

先に述べたようにグラウティング工法においては不明瞭な点が多く、効率的なグラウティングを実施するにはグラウティングのメカニズムそのものを明らかにする必要がある。今回は節理性岩盤についてグラウティングにおけるグラウトミルクの充填メカニズムを探ることを目的として、実際の岩盤ブロックに対してグラウティング工を実施し、解析を試みた。

実験サイトは高松市郊外の庵治町にある花崗岩の石切り場に位置する。岩盤を掘削し作成した供試体の大きさは、幅1.3m×奥行き1.8m×高さ1.5m程度である。この岩盤ブロックに対して岩盤表面の節理調査を実施した後、ブロック後面に岩盤を覆う形で水室を設け、側面にコンクリートを打設して不透水境界とした。流体が後面の水室から前面の透水境界へと向かう一方向の定水位透水試験を実施した。岩盤ブロックの透水性状を把握した後、グラウティング工を施工した（図1）。透水試験では昇圧・降圧段階ともに流量と圧力が線形関係にあり、ダルシー則が成立していたことが認められた。また岩盤ブロックの透水係数は 1.54×10^{-4} cm/secであった。また、注水を始めてから、定常状態に達するまでの時間は5分以内であり、流出状況を見るとブロック内部の浸透流は飽和した状態であったと考えることができる。

グラウティング工実施の際には岩盤ブロックを傷めないように注入圧力を低めに設定した。注入圧力は終始0.6～0.8kgf/cm²の間でほぼ一定の値をとった。使用したグラウト材は普通ポルトランドセメント（字部セメント）であり、一般的なグラウティング施工法に準じて薄いグラウトミルクから濃いミルクへと配合を切り替える方法を用いた。（表1）グラウティング中は流出グラウトミルクの性質を調べたが、注入したミルクとほぼ同じ濃度のものであり水室内でのブリーディングは十分無視できるものと思われる。ミルクの抜け落ちを考慮してグラウティング完了後もしばらく同じ圧力を保った。

流量が0になった時点でグラウト完了とし、要した時間は126分であった。これは一般的なダム建設工事におけるグラウティングの完了時間と比較しておおよそ標準的なものである。なお、積算流量は147リットルであった。

表1 グラウト液のセメント配合切り換え表

W/C比	水リットル	セメントkg	総量kg	積算リットル
10/1	40	4	44	41
4/1	40	10	50	85
2/1	40	20	60	131
1/1	20	20	40	158

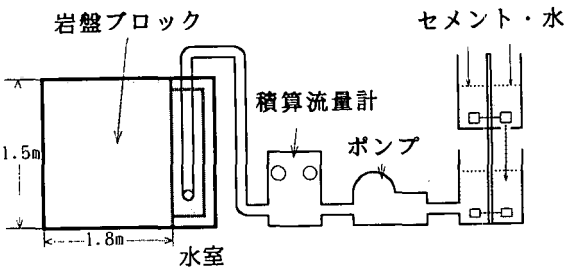


図1 グ라우ティング概要図

グラウチング工完了後、一週間程度の養生期間を置いて岩盤ブロックを解体して節理の3次元的な分布状況とグラウトの付着状況を調査した。岩盤ブロックを節理面に沿って丁寧に逐次掘削し節理面が現れるごとに節理面全体にわたるグラウトの付着状況を調査し、グラウトの厚みを面上の数点で計測した。このようにして掘削と調査を繰り返してブロック全体の節理分布状況とその節理面内を流れたグラウトミルクの分布状況を記録した。グラウトミルクの流れはどの節理面上においてもほぼチャンネリング形態を示していた。これらのデータを基にグラウトミルクの流れ及びグラウチングの充填メカニズムをモデル化し、シミュレーションを実施したのだが、これについては後述する。

4. グ라우チングの充填メカニズムに関する考察

節理性岩盤においてはグラウトミルクによる目詰まりは、セメント粒子が割れ目を閉塞、充填することにより水の流れを遮断することと定義することができる。そこで今回筆者らはセメント粒子の閉塞過程を次のように分類することを試みた(図2)。

①吸着モード：これは、セメント粒子が機械的に割れ目の凹凸に捕捉されたり、化学的吸着作用により岩盤壁面に吸着していくものである。このような仕組みは実験的に確認された例がある。

②沈降モード：これは流れによる掃流力とそれに対する抵抗力との関係でセメント粒子が沈澱、拘留されるものである。

③凝結モード：セメントの凝結が始まることにより、セメント粒子どうしが結合され、流速が急激に減少し、結果的に沈降収縮を起こすものであるが、沈降モードがその場所における流速の関数であるのに対し、これは時間の関数であることが大きな違いである。

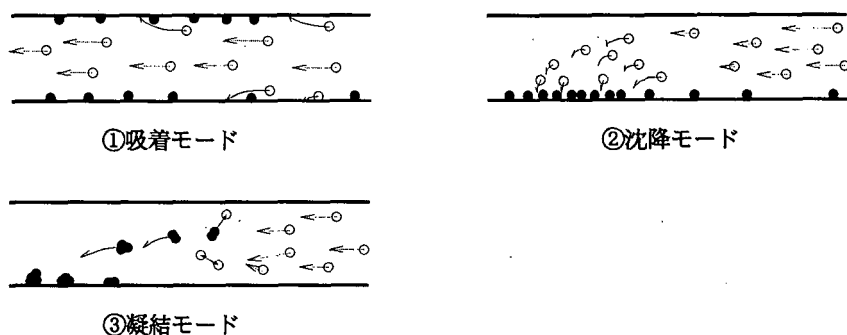


図2 グラウトミルクの閉塞過程

このようにグラウチングの充填時間はセメント量、流速、時間の3つの要素に基づく関数であると考えられる。①、②のモードは共に割れ目の複雑さ、不規則性を考えると粒子運動論を適用してモデルを構築することは難しく、また実用的でないため、水理計算に主眼を置いてモデルを構築する方が合理的である。実際には、この3つのうちのどれかにあてはまるというのではなく、その時の条件により、この3つの組み合わせでどれかが大きく影響するという仕組みになっていると思われる。

今回は吸着モードを用いてグラウチングメカニズムをモデル化し、節理性岩盤ブロックに対してグラウチングシミュレーションを実施した。

5. 吸着モードによるグラウチングのシミュレーション

5.1 数式モデル

ここで取り上げる濁質拘留モデル¹⁾は過去において濃度の低い懸濁液を対象として研究されたものであり、流路内のある場所において吸着していく粒子の量は時間の経過にともない、そこを流れる粒子の量に比例して増加するという仮定に基づいている。また、節理内流れの水理モデルであるが、これは複数パイプモデルで近似できることが知られており²⁾、また、グラウトミルクの流れは流量が圧力に比例する事が様々な現場で散見されるので、ダルシー則が成立すると仮定した。

以上の仮定に基づいて基礎式を次のように定めた。

1. 粒子吸着モデルの基礎式

$$\frac{\partial S}{\partial t} = K_b \omega \lambda C$$

2. 物質保存式

$$\frac{\partial S}{\partial t} + \frac{\partial (\lambda C)}{\partial t} = - \operatorname{div} (\omega \lambda C)$$

3. 水理モデル

$$Q = k \cdot A \cdot i$$

4. 透水係数

$$k = \frac{g \cdot t^2}{32\nu}$$

S: 流路閉塞固相体積、 K_b : 吸着係数、 ω : 実流速、 λ : 空隙率、C: グラウト濃度、A: 流路断面積
k: 透水係数、i: 動水勾配、g: 重力加速度、t: 開口幅、 ν : 動粘性係数

第1式、モデルの基礎式はこの仮定を数式で表したものである。左辺は粒子が吸着することによる固相体積の時間的变化で右辺は単位時間あたりに流入する物質の量を表現している。比例係数 K_b は未知であり、いくつかの値に対して検討する。第3式はダルシー則に従ったものである。また、グラウトミルクの流れは節理のみを浸透経路とし流れの連続性が成立しているものとする。第4式は円管の透水係数である。節理性岩盤における地下水流れは複数パイプフローモデルでよく近似できることが知られており、今回の岩盤ブロックにおけるグラウチング実験でも、グラウトミルクの流れがチャンネルフローであることが確認されたのでグラウト流れを複数パイプモデルで近似することにした。

5.2 シミュレーション

グラウチングのメカニズムを研究するにあたっては個々の節理における流れに着目する必要がある。そこで岩盤を不連続体として扱うことにより解析を実施した。解析の流れとしては節理分布モデルの初期状態、つまり定常的に水が流れている状態から始まり、グラウトミルクを注入を開始して、時間が経過した後、流量が0になったと認められる時点でグラウト完了とした。

解析にあたっては前述した岩盤ブロックの調査から得られたデータを用いて節理分布の決定論モデルを作

成した。前項によってモデル化されたグラウト流れ及びグラウト充填過程を有限要素法と差分計算を用いて計算する。

解析の手順は図3のようなものである。岩盤ブロック全体にわたって3次元的に分布した節理分布モデルに対して一次元の有限要素法を用いて流れの解析を実施した。個々の流れ要素については、有限要素法から得られたデータを基にして、各節理データを引き数とし、差分を用いて繰り返し計算を行い、新しい節理分布モデルを作成して、これに再び有限要素法を適用することにより全体にわたる流れの解析を実施した。

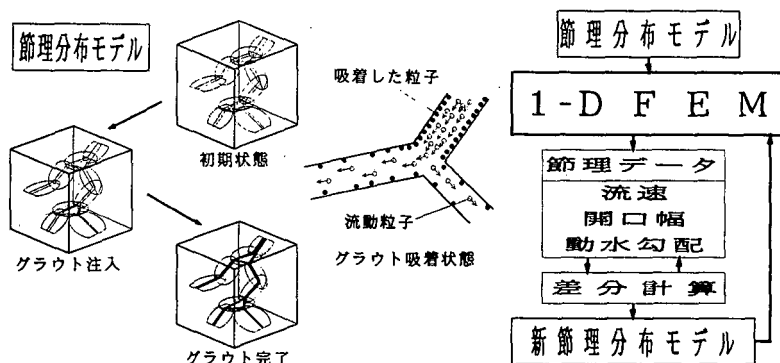


図3 解析の流れ

得られた結果はここに示すとおりである。これを見ると、吸着係数が $K_b = 1.0$ 付近で約140リットル注入後ほぼ2時間半が経過してグラウトが完了するという現実に即した値となっている。(図4)

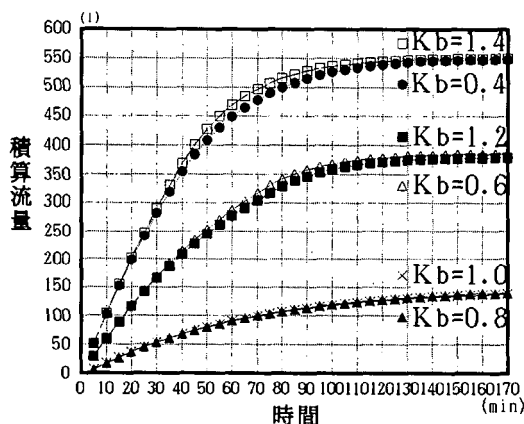


図4 吸着係数と充填時間との関係

現時点ではこのグラウティングモデルの妥当性が評価できない以上、吸着係数の値はあくまでも目安にすぎないが、今後はパイプを使用した岩盤模型等を利用してグラウト流れに関する実験を行ない、さらに沈降モードや凝結モードに関する考察を加えてこうしたパラメータの推定を試み、精度の良いモデルを確立する所存である。

参考文献

- 1) 佐藤邦明・伊藤洋：岩盤内浸透流の時間依存と目詰まり機構，土と基礎，Vol.36, No.4, 1988.4.
- 2) 菊地宏吉・水戸義忠・吉川浩二・神田耕治・中田雅夫：節理性岩盤の現場浸透流実験とその解析，第9回岩の力学国内シンポジウム，1994.1.