

(54) 節理性岩盤におけるグラウトの充填メカニズムに関する室内実験
Laboratory Study on the Filling Mechanism of Grouting in Jointed Rock Mass

水戸 義忠*・吉川 浩二**・菊地 宏吉*・山田 文孝***
Yoshitada MITO, Kohji KIKKAWA, Kohkichi KIKUCHI, Fumitaka YAMADA

In order to realize the effective rock grouting, the mechanism of grouting in rock masses must be clarified. The laboratory experiments concerning the flow of grout milk was carried out in this study. As the results of the experiments, the followings were obtained;

- ・ Grout milk can be treated as Newtonian fluid.
- ・ Critical value of deposition was obtained.
- ・ Critical value of setting was obtained.

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。グラウチング工法は岩盤中の空隙（ダム等の基礎においてはそれは主に節理等の不連続面である）にグラウト剤を注入して間隙を充填することにより、基礎岩盤の透水性と力学特性を改良し基礎全体を固密化・一体化・均質化することを目的とするものである。

グラウチングはダムの施工において従来より多くの実績を挙げてきた岩盤改良工法であるが、その施工方法は経験に基づくところが大きく、より一層の効率化が求められている。ここで、効率的なグラウチングについて考える場合、①予測、制御が可能であり、②所定の範囲を十分に改良し、③短時間で完了することが重要であるものと考えられる。

このような効率的なグラウチングを実現するにあたっては、岩盤内におけるグラウチングのメカニズムを把握することが必要不可欠であると考えられるが、現実には、対象となる岩盤の性状が多様多様である上に、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、グラウト注入から閉塞・充填・固結に至る現象を把握することが非常に困難となっている。

そこで、本研究においては、グラウトの挙動を①基本的な流れの性質と②閉塞・充填の性質について室内試験により検討した。

2. 節理におけるグラウトミルクの充填機構に関する考察

グラウチングの充填過程はセメント量、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。節理におけるグラウトミルクの充填はセメント粒子が節理を閉塞、充填することにより水の流れを遮断することと定

* 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

** 京都大学大学院 工学研究科 修士課程（現 東京電力㈱）

*** 三井建設㈱

義することができ、セメント粒子の閉塞過程を主に次のように分類する。なお、○はこの後も引き続き流れの状態を維持する可能性がある粒子であり、●は流れる可能性の低い粒子である。

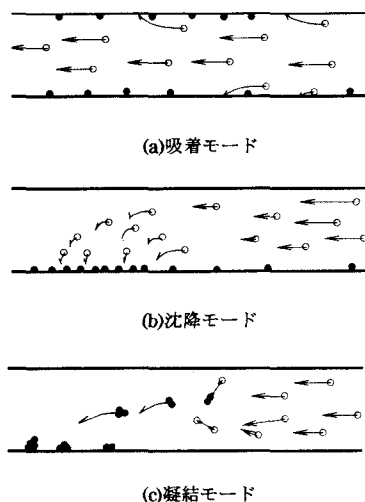


図-1 グラウトの充填機構の概念

①吸着モード：これは、セメント粒子が機械的に節理の凹凸に捕捉されたり、化学的吸着作用により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¹⁾があり、十分妥当性がある(図-1(a))。

②沈降モード：これは流れによる掃流力とそれに対する重力等の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(図-1(b))。

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-1(c))。

ただし以上の考察はセメント粒子の寸法が節理の開口幅より十分小さい場合を仮定している。また上2つのモードについては、

共に節理面形状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のは難しく、また実用的でないため、水理計算に主眼をおいてモデルを構築するのが理にかなったものと思われる。なお、本論文においては、このうち、沈降モードならびに凝結モードについて検討を行うことにする。

3. グラウトミルクの流動特性に関する実験

セメントミルクは水とセメントの配合の度合いによって様々に性質が変化する。セメントの量が少なく水の影響が著しく大きい場合はセメントミルクを水と同種のニュートン流体と仮定しても良いが、セメントの量が多くなるに従い、セメントの影響がセメントミルクの流体としての性質を支配するようになるとこれを非ニュートン流体として扱わなければならない。ここではグラウトミルクの流れが配合によりどの程度までがニュートン流体として仮定できるのか、そしてそれはグラウトミルクの流れをニュートン流体として仮定する際にどの程度の誤差として影響を及ぼすのかについて検討するために、微細なガラス管を用いてグラウト流れにおける圧力と流量の関係の変化を計測した(図-2)。また、管径の違いによりセメント粒子の寸法効果が現れるかどうかを確認するために異なる管による実験も実施した。

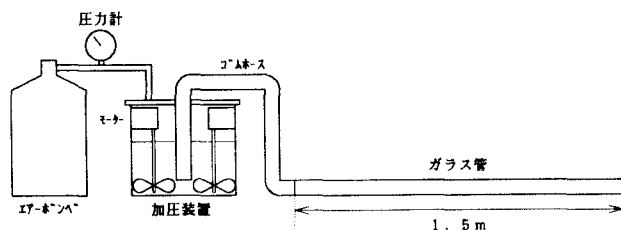


図-2 実験装置の概要

3.1 ガラス管の透水性

まず、実験に用いるガラス管の性質を調査するためにガラス管に対して透水試験を実施した。ガラス管の内径は 2.0、1.0、0.5 mm の3種類である。

このガラス管に注入装置を取り付け、水を注入して、このガラス管の透水特性を調査した。圧力は 3 kgf/cm

2 まで段階的に変化させ単位時間当たり流量を計測した。なお、圧力制御後すぐに定常状態が確認され、昇圧・降圧段階ともに等しい流量が確認された。2.0 mm 管では層流状態の範囲が狭く詳細な検討はできなかったが、1.0 mm 管については層流状態で理論値に近い流量となり、0.5 mm 管については計算上の管径は 0.53 mm であった。

3.2 グラウトミルクの流動特性

1 mm 管を用いて、グラウトの配合をパラメータとした P-Q 曲線を図-3 に、配合 1:4 の基で管径をパラメータとした P-Q 曲線を図-4 に示す。

図-3 から、低圧力レベルでは圧力と流量の関係が明らかに線形的であることがわかる。この関係は特に低い配合のミルクほど顕著であり、濃いミルクほどやや直線から外れて P-Q 曲線は下に凸の曲線になっている。この結果から判断すると少なくともこの範囲内ではグラウトミルクの流れをニュートン流体と仮定しても支障はないと考えても良い、即ちダルシー則を適用してもよいと考えられる。

また、低い配合のグラウトミルクでは P-Q 曲線が直線的に延びた後折れ曲がり、あるいはなだらかに横軸と平行に延びている様子がみられる。これはミルクの性質がニュートン流体である水に非常に近いものであり、層流状態から乱流状態に移移する現象が表れているものと考えられる。

また、管径の違いについて考察すると、立ち上がりの直線勾配部分において 2.0 mm 管、0.5 mm 管ともに 1 mm 管の約 10 倍、1/12 倍の流量であった。これを見ると寸法効果はみられず、また管径の誤差を考慮すれば（ガラス管の透水試験結果を適用すれば 0.5 mm において 1/12 倍の流量という結果は水と一致する。）ハーゲンポアゼイユ流と仮定しても（理論的には 16 倍、1/16 倍）オーダー的に誤差が小さく、妥当であると考えられる。

以上の考察よりグラウトミルクは動水勾配 2.7 以下の条件下で流路の凹凸による影響を受けない限り、ニュートン流体と仮定できることが判明した。

4. 沈降モードによるグラウト充填過程に関する実験

グラウト液の配合及び圧力を段階的に変化させ、グラウト充填過程における流量の経時的変化を測定した。このようにしてグラウト充填過程において支配的な要因となるパラメータを推測した。なお、今回は 1 mm 管を用いて実験を行った。

上述の試験装置を用いて、流れが定常状態になったと認められる時点を時間 0 とし、それより計測を開始した。5 分毎もしくは 2 分毎に細管より一定時間内に流出したグラウトミルクの流量を計測した。

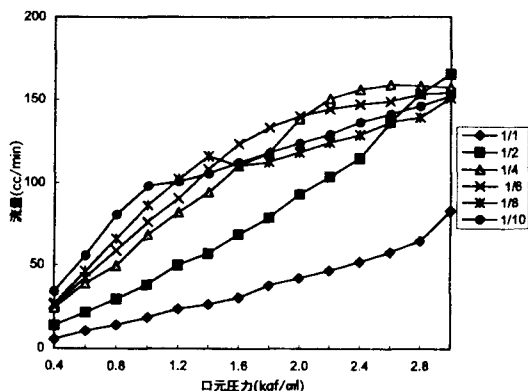


図-3 配合における PQ 曲線

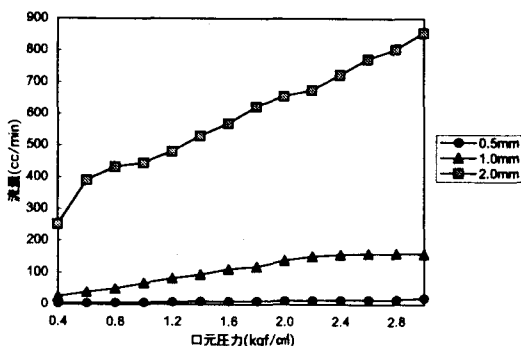


図-4 管径における PQ 曲線（配合 1:4、凡例は管径）

各水頭差において流出した量を直径 1 mm の流路面積で除した計算流速を図-5 に示す。いずれのグラフを見ても一定の圧力以下になると流速が落ち、やがてガラス管が閉塞され、セメント粒子が充填されるという現象が見られる。これはグラウトミルクを均質な流体としてみた場合のレオロジー的な性質が現出したものであると考えられる。また、セメント粒子の水中での挙動と見るならばこれはセメント粒子の動水中の沈降現象と考えることもできる。

これらのデータの特徴としては前述したものの他に臨界点以下になると圧力が低いほど短時間で閉塞・充填現象が見られ、また特に低い場合はグラウトミルクが距離 1.5 m のガラス管出口まで達せずに途中で閉塞するという現象がみられる。また濃度が高いほど高い圧力でも閉塞する、つまり閉塞し易い傾向にある。これは指数関数的な挙動を示し、配合 1 : 1 の場合に顕著に見られる。

表-1 充填がおきる臨界値

配合C:W=	動水勾配	充填時間
1:10	0.133	35分
1:6	0.2	25分
1:4	0.2	25分
1:2	0.267	10分
1:1	2.667	32分

これらの結果をまとめたものが表-1 である。グラウトミルクは表中の臨界圧力以下になると閉塞・充填現象が生じた。表中の充填時間とはグラウトミルクを注入してから流量が 0 になるまでの時間である。

5. 凝結モードによるグラウト充填に関する実験

セメントの凝結に起因するグラウトミルク自身の経時的な変化を調査するために、セメントと水を規定の配合で混合した後、上述の試験装置を用いて一定時間ごとに P-Q 関係を測定した。

実験結果を図-6 に示す。配合 1 : 4 のグラウトミルクでは時間の経過に対して流れの挙動はほとんど変化が見られない。これに対して 1 : 2 のミルクは時間の経過に従って流量が減少している。これは外的な要因がない以上セメントと水の間に構造的な変化が生じつつあることを示唆するものと考えることができる。

セメントの凝結はセメント粒子間をエトリンガイト等の生成物が橋渡しをする事によって、セメントミルクがセメント粒子の分散する流動体から、全体的に絡み合うように網状的な組織の卓越する構造的な固体へと変化していく訳であるが、概観的に、セメント粒子の間隔が狭いほどこの橋渡しは容易になり、凝結が早まるということは十分考え得ることである。また、セメント粒子の間隔が、セメント粒子の大きさと、橋渡し物質の代表寸法で決定されるある一定の距離より狭くなれば、固体物質間の絡み合いによりセメントミルクの流動性

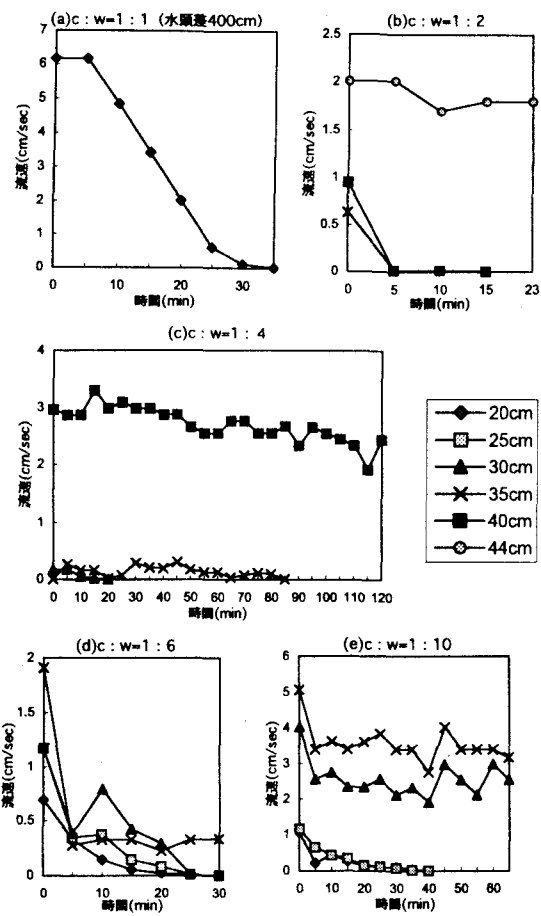


図-5 配合による流速変化（凡例は水頭差）

が著しく失われてしまうということが考えられる。これらの仮定を正しいと考えれば実験結果は1:2の濃度と1:4の濃度の間にセメントの凝結過程の早遅を決定する臨界点があるということを示すことになる。セメントの凝結過程が明確に定義できない以上、理論的な裏付けは示すことが出来ないが、実験結果により、1:2より濃いミルクは時間と共に凝結が原因となって粘性が変化するという知見が得られた。

この仕組みは直接グラウトミルクの充填に至るものとは考えにくく、流速を減少させ、前章の沈降による閉塞・充填を促進させるような間接的な役割を果たしているものと推察される。

6. おわりに

本研究ではグラウトミルクの流れ挙動から閉塞・充填過程に至るまで、グラウチングのメカニズムに関わる様々な考察を行った。

まず、グラウトの閉塞・充填過程が①吸着モード・②沈降モード・③凝結モードの3つのモードにより生じると推察し、グラウトの流動特性について検討した後に、②沈降モードおよび③凝結モードについて、室内試験結果を基に考察を行った。得られた結論は以下の通りである。

- I グラウトミルクは一定の動水勾配以下の基でニュートン流体で仮定できる。また、濃度の低いグラウトミルクは圧力を上昇させると乱流状態に遷移するため流量が伸びず、高圧では濃度の高いものを用いる方がよいという知見が得られた。
- II 沈降、凝結モードについての実験によりそれぞれ閉塞・充填現象が見られ、これらのモードの有意性が示された。
- III 沈降モードについては、定常状態から閉塞・充填現象への臨界値に関する知見が得られ、これによりグラウトミルクの閉塞・充填のモデル化が可能となった。
- IV 凝結モードについての実験では配合1/2のミルクで粘性の時間変化が認められた。

本研究では基礎的な成果を挙げるにとどまったが、今後は実岩盤の節理を用いて実験を行っていく所存である。

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

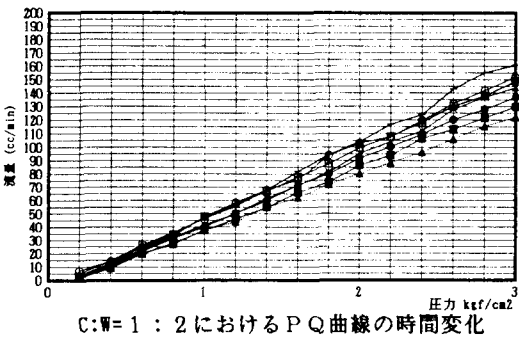
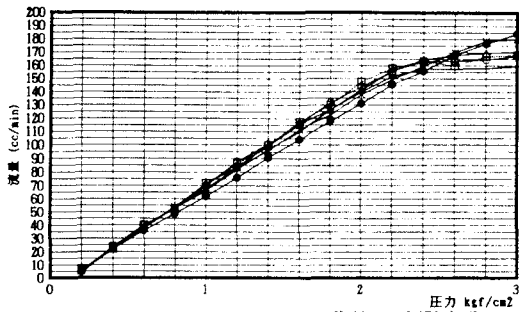


図-6 配合1:2と1:4の粘性変化の比較