

**投稿論文** (和文ノート)

**TECHNICAL  
NOTE**

# 岩盤注入セメント系グラウトの浸透挙動に関する検討

米田俊一\*・向上拡美\*\*・寺戸康隆\*\*\*・  
中川浩二\*\*\*\*

微小割れ目が発達した岩盤へのセメント系グラウトの浸透限界を、実岩盤の節理における高炉セメントと超微粒子セメントの充填状況をはぎ取り調査することによって確認した。また、グラウチングの目詰まりのモデル機構と室内注入実験との対応から、目詰まりをグラウト中のセメントの分離沈降から説明した。この浸透挙動については、前記の現場採取グラウト片の化学分析からもその特徴を示すことができた。

**Key Words** : grout, fine cement, permeation, groutability, clogging

## 1. まえがき

岩盤注入工法は、定性的にも定量的にも的確な把握が困難な多種多様の自然体である節理性岩盤あるいは強風化岩盤を対象としている。このため、グラウチングの材料設計や注入工法の最適設計は必ずしも理論的でなく、現場対応型で進歩してきた。

しかし、より効果的なグラウト材料および注入工法の開発に当っては、ひとつには、注入現象の解明や注入機構の理論的、系統的研究などの発展が、他方で、グラウトの材料、注入工法と注入実績との両者を関係つけるための実験室データならびに現場データの蓄積・充実が必要と考えられる。

本研究は、セメント系グラウトの室内モデル実験および現場グラウチング実験に関する前報<sup>1)</sup>を補足するために、前に実施したモデル実験からグラウトの浸透機構を推察するとともに、これに実岩盤のはぎ取りによるグラウト浸透の実態調査とを関連つけて検討したものである。

## 2. セメント系グラウトの浸透性実験

セメント系グラウトの注入対象は、大別して、砂層と岩盤節理とに分けられる。岩盤節理においても、風化が進み、例えば花崗岩のように一部マサ化した岩盤などでは、節理内のグラウトの浸透挙動は砂層におけるものに近いと考えられる。

筆者らはこれらに対するグラウトの浸透性を検討する目的から、a) 砂層、b) 岩盤割れ目のそれぞれの室内モデルの1次元浸透実験を行った<sup>1)</sup>。

なお、以下、モデル実験のように人工的に作ったひび割れは、単に、割れ目と称し、自然岩盤の割れ目は節理と表現することにする。

前報<sup>1)</sup>の実験では、粒径の異なる超微粒子セメントU1、U2、U3の3種(加積通過平均径、3.5~5.5 $\mu\text{m}$ )および早強(記号H)、高炉B種(記号BB)、普通(記号N)の通常セメント3種(同平均径、10.5、13.9、15.3 $\mu\text{m}$ )の計6種類のセメントを使用し、水セメント比200、400、600%のセメントミルクの浸透性を調べた。

試験に用いた砂層モデルについては、従来から砂層の浸透限界の判定指標として用いられているグラウタビリティ $G_s$ (加積通過率15%の砂粒子径/加積通過率85%のセメント粒子径= $D_{15}/G_{85}$ )で浸透性の可否が判断できることを確認した。すなわち、 $G_s > 15 \sim 25$ で浸透可能、 $G_s < 10$ では浸透不可能であることがわかった。

また、岩盤割れ目モデルについても、割れ目幅とセメント粒径の比 $G_r$ (割れ目幅 $w/G_{85}$ )が浸透性と密接な関係があることを見だし、浸透限界として、 $G_r = 10$ 前後の値を得た。これらの室内実験と現場実験とを対応つけるものとして、風化花崗岩切り取り地山のグラウト処理後のチェック孔コアの電子顕微鏡観察を行い、超微粒子セメントは幅65 $\mu\text{m}$ の微細節理( $G_r = 6.5$ 相当)まで注入できており、一方高炉セメントは幅125 $\mu\text{m}$ ~150 $\mu\text{m}$ の節理( $G_r = 3.8 \sim 4.5$ 相当)には未浸透であることを確認した。しかしながらこれらの結果は限られた条件下での知見であり、さらに実証事例を蓄積して適用性を確認する必要がある。また、前報<sup>1)</sup>では、セメント粒径と間隙寸法に支配される浸透限界を主に論じたので、グラウト浸透量の時間変化など、間隙内での流動挙動の説明は行っていない。そこで本研究では、前報<sup>1)</sup>に以下の点を補足することを目的とした。

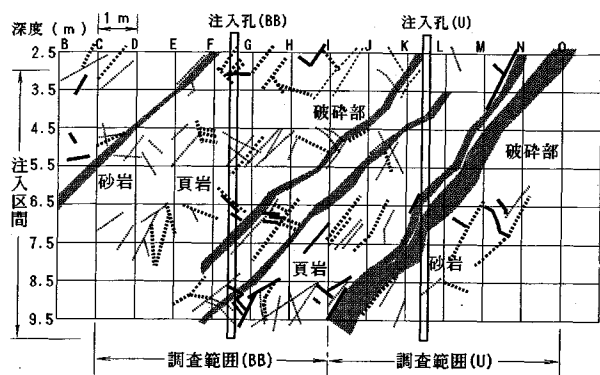
① グラウトの浸透限界の判定基準である $G_r$ の適用性を実岩盤のはぎ取り調査によって検討する。

\*工修 宇部興産(株)セメント事業部技術部  
(〒140 東京都品川区東品川2-3-1 UBEビル)

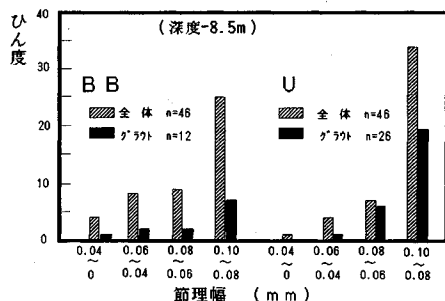
\*\* (株)間組 技術研究所研究第1部

\*\*\* 日本基礎技術(株)調査設計第3部

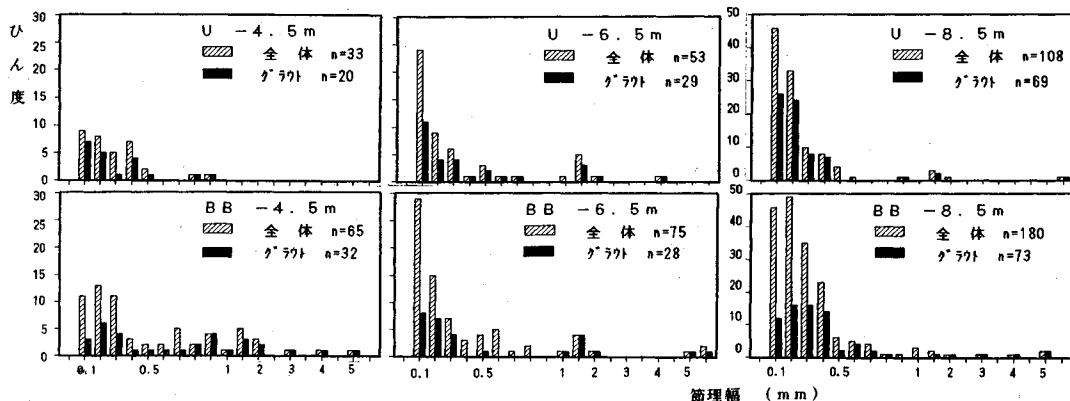
\*\*\*\* 工博 山口大学教授 工学部社会建設工学科



図一 はぎ取り調査断面スケッチ



図三 微細節理グラウト侵入状況



図二 はぎ取り調査断面の節理幅分布およびグラウト侵入状況

② グラウトの施工性および改良効果と関連させるためには、間隙内の流動挙動およびグラウト処理後の充填形態を明らかにする必要がある。このため、前のモデル実験データ<sup>1)</sup>を用いて浸透・充填現象を解析する。また、解析上の仮定と現場の注入形態との関連を検討する。

### 3. 実岩盤におけるグラウト浸透限界の調査

グラウト浸透可能な岩盤節理幅についての詳細な情報を得ることを目的のひとつとして、超微粒子セメントU (U1と同等品)と高炉セメントBBを注入した実岩盤<sup>2),3)</sup>を表層から段階的にはぎ取り調査した。図一に調査断面を示す。グラウトは二重管ダブルパッカー工法を用いて深さ2.75~9.75mの間で水セメント比600%のセメントミルクを注入しており、2本の注入孔を通る断面ではぎ取りを行った。グラウトの浸透性調査は深さ4.5~5.5m, 6.5~7.5m, 8.5~9.5mの3段階で行っている。図二は各段階で得られた節理の幅とその節理でのセメントグラウトの有無を示したものである。図三は深度8.5~9.5mを例にとり、節理幅0.1mm以下について示したものである。

各々の節理にグラウトが存在する割合、すなわち充填率はセメントの種類によって差異があり、BBの充填率は節理幅0.2~0.3mmをピークに、節理幅0.1mmで

は低下する傾向があるのに対して、Uでは0.06mm程度の微細節理まで充填率の低下はみられない。また、BBも0.06mm以下の微細節理までグラウトが充填されているが、充填率はUの方が高い。これらの図からグラウト充填率が50%以上になる節理幅をグラウトの浸透限界の目安と考えて、先の $G_f$ に換算すると、BBの場合 $G_f=7.6$ 、Uの場合 $G_f=9.0$ となる。モデル実験<sup>1)</sup>では、岩盤モデルの割れ目幅を一定(200, 300 $\mu$ m)とし、セメント粒径をU1からNの6段階に変化させて浸透限界( $G_f=10$ )を求めており、節理幅の方が変化する今回の調査とは変動因子が異なっているが、両者の $G_f$ の大きさはほぼ対応している。これは、実施工においてもセメント粒子径 $G_{85}$ の10倍の間隙までは、かなりの確実さで浸透可能であることを示すものである。

### 4. 目詰まりモデルとその適合性

前述のはぎ取り断面において観察された多くのグラウトは節理の間隙全体を充填し、その硬度はかなり高いものであった。このことは初期の希薄配合のグラウトが硬化に至るまでに濃縮されたことを意味している。このような濃縮現象はグラウト中のセメント粒子が、分離沈降、間隙壁面への物理的捕集、あるいは吸着などによってグラウトの通過メディアに付着・拘留されることによって

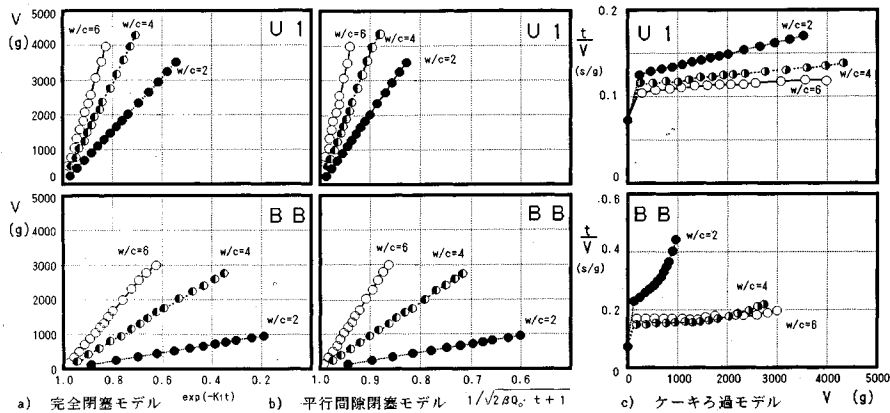


図-4 岩盤割れ目グラウチング実験と目詰りモデル (分散剤使用, 通過メディア: 割れ目幅  $w=200 \mu\text{m}$ )

生じると推察できる。また、このような現象はある種の目詰り現象と考えることができる。そこで本研究では、岩盤内浸透流による長期目詰りの研究<sup>4)</sup>および化学工学分野のろ材ろ過の研究<sup>5)</sup>を参考にしてグラウトの目詰りとそのモデルの適合性を検討することにした。

a) 完全閉塞モデル

岩盤割れ目を、直径と長さの一樣な平行毛細管の集合とみなし、グラウト中の懸濁物質 1 個が通過しようとする 1 本の毛細管の入り口あるいは内部で拘留され、その毛細管が完全に閉塞されると仮定する。初期浸透流量を  $Q_0$ 、閉塞係数を  $K_1$ 、時間  $t$  までの累加流量を  $V$  とすると、次式が得られる。

$$dV/dt = Q_0 - K_1 V \dots \dots \dots (1)$$

さらにこの式を積分すると以下の式が誘導される。

$$V = Q_0 / K_1 (1 - e^{-K_1 t}) \dots \dots \dots (2)$$

b) 平行間隙閉塞モデル

岩盤割れ目のような平行間隙では、グラウチングの進行とともに懸濁物質が壁面に吸着あるいは拘留して、平行間隙のすき間が減少すると仮定する。初期のすき間を  $d_0$ 、グラウチング進行後のすき間を  $d$ 、流路長を  $L$ 、流路体積を  $s$ 、閉塞係数を  $K_2$  とすると、

$$s = dL = d_0 L - K_2 V, \quad d = d_0 - \frac{K_2}{L} V \dots \dots \dots (3)$$

となる。この式 (3) と平行間隙内の粘性流の式とから、

$$dV/dt = Q_0 (1 - \beta V)^3 \dots \dots \dots (4)$$

が得られる。ここで、 $\beta = K_2 / (L d_0)$  となり、これを積分して次式が得られる。

$$V = \frac{1}{\beta} (1 - (2\beta Q_0 t + 1)^{-1/2}) \dots \dots \dots (5)$$

c) ケーキろ過モデル

グラウトの浸透条件が非常に厳しい場合には、注入孔の近傍あるいは岩盤割れ目の不連続変化部などで、濁質がケーキ状に堆積することも想定される。この場合のグラウト液はケーキ内部の毛細管を通過しなければなら

ず、グラウチングの時間に比例してその毛細管の長さが増加することになる。ここで、閉塞係数を  $K_3$  とすると、以下の式が得られる。

$$\frac{t}{V} = \frac{K_3}{2} V + \frac{1}{Q_0} \dots \dots \dots (6)$$

先の室内モデル実験<sup>1)</sup>とこれらのモデル式との適合性の検討例を図-4 に示す。式 (2), (5), (6) と対応させるため、いずれの図においても独立変数と従属変数は 1 次の関係となるように選び、また、従属変数の範囲は実験の範囲に合わせて図示している。従って図において実験結果が広範囲に直線的であるほど実験の範囲でモデルとの適合性が高いことになる。なお、完全閉塞モデルの係数  $K_1$  と平行間隙閉塞モデルの係数  $\beta$ 、 $Q_0$  はあらかじめ最小二乗法で求めたものを用いた。

図-4 から、岩盤割れ目グラウチングについては、全段階を毛細管閉塞モデルあるいは平行間隙閉塞モデルで良好に近似できることがわかる。

図-5 は、岩盤割れ目モデル実験の目詰まりを式 (5) で近似し、さらに間隙幅の変化、すなわち充填幅比を式 (3) で求めたものである。図より、間隙幅の変化量はグラウト濃度が高いほど大きくなるが、超微粒子セメントを除くセメントの粒子径はあまり影響していない。この傾向は、図-6 に示すグラウト沈降試験完了時の堆積物の沈降高さ比と良く対応しており、岩盤割れ目の目詰まりとセメント粒子の分離沈降とを結び付けて考えることが可能なことを示すものであろう。このモデル実験では割れ目の方向が水平であったので、目詰りの諸要因の内で、分離沈降の影響が大きく作用したものと考えられる。

5. はぎ取り調査採取グラウトサンプルの分析

前述の実岩盤はぎ取り調査断面からグラウト片を採取し、組成の分析を行っている。これらのグラウトには充填状況の観察を容易にするため、高炉セメントには緑色顔料 (主成分酸化クロム,  $\text{CrO}$ , 平均粒径  $0.35 \mu\text{m}$ )

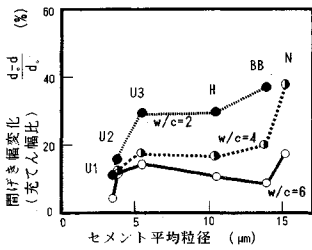


図-5 間隙率変化 ( $t=360$  sec)

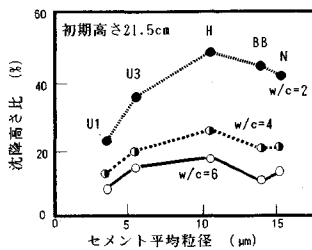


図-6 分離堆積物高さ (沈降試験)

を、超微粒子セメントには赤色顔料(主成分酸化鉄,  $Fe_2O_3$ , 平均粒径  $0.09 \mu m$ )を、各5% 混入している。

両セメントともに注入配合のまま硬化すればグラウト片の比重は約1.1でなければならないが、図-7に見られるように、比重は2以上から1.5以下まで広い範囲で分布し、かなり濃縮されていることがわかる。このことは、グラウティング中にセメントの分離沈降が生じたとして説明可能であり、前章の目詰まりモデル機構による推察と一致している。

超微粒子セメント中の顔料含有率はサンプル片の比重によって、大きな差はないが、高炉セメント中の顔料含有率はサンプルの比重が小さいほど高くなっている。顔料の粒径はセメントのそれより2桁近く小さいので、重力沈降の際には最も遅く沈降する。高炉セメントの場合には、水とセメントとの分離が生じる際に、セメントと顔料との分離も引き起こされていることを示すものである。このことから、高炉セメント自体も粗粒のものと微細粒のものが分離していることも推察される。先のグラウト充填状況調査において、高炉セメントも0.06 mm以下の非常に微細な節理まで侵入することがあること(図-3参照)は、この分離現象によって説明ができる。

## 6. まとめ

岩盤割れ目モデル実験の検証のため、グラウト処理後の実岩盤のはぎ取りを行って浸透限界の指標を確認した。また、本実験では、割れ目モデルが1次元の水平方向であること、あるいは使用グラウトが水セメント比200, 400, 600%のセメントミルクである等の限られた範囲であるものの、注入特性の時間的変化の機構は、完全閉塞モデルあるいは間隙閉塞モデルで説明できること

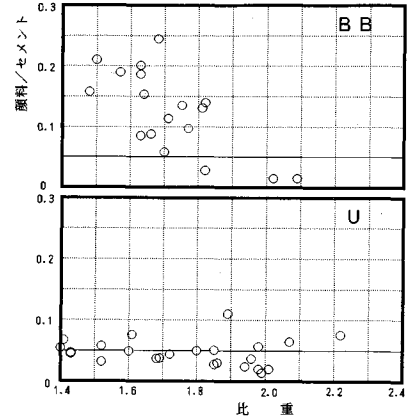


図-7 採取グラウト片中の顔料含有率

がわかった。また、この閉塞の主たる原因が懸濁物質の分離沈降と密接な関係があることが推察された。このようなグラウトの分離沈降現象は、実岩盤注入の場合にもみられることをグラウトサンプルの化学分析によって示すことができた。

本研究のはぎ取り調査は、間組、日本基礎技術、ダイヤコンサルタント、川崎地質の各社と宇部興産および山口大学とが協同で行ったものである。特に、現地調査では、山口大学中川研究室の学生諸氏には多大の労を頂いた。ここに記して関係各位に謝辞を表す。

## 参考文献

- 1) 米田俊一・中川浩二：粒子径を変えた各種セメントグラウトの基礎的性質と浸透性比較，土木学会論文集，No. 462/VI-18, pp.101~110, 1993.3.
- 2) 北村孝海・米田俊一・寺戸康隆・中川浩二：岩盤レーダーによる水みち推定およびグラウト硬化過程と効果の推定，土木学会論文集，No. 454/III-20, pp.83~92, 1992.9.
- 3) 寺戸康隆・春日 明・結城則之・米田俊一・中川浩二：はぎ取り調査における注入後のグラウト侵入形態と亀裂系および亀裂性状の関係，第24回岩盤力学シンポジウム講演会論文集，pp.116~120, 1992.2.
- 4) 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.35, No.4, pp.21~25, 1988.4.
- 5) 白戸紋平・杉本泰治：濾過のメカニズム，地人書館，pp.195~205, 1982.

(1993.5.6 受付)

## SOME PENETRATIVE BEHAVIOUR OF CEMENT SUSPENSION GROUT IN FISSURED ROCK MASS

Shunichi YONEDA, Hiromi KOJO, Yasutaka TERADO and Koji NAKAGAWA

We made an attempt on open cutting the ares where a grouting test was provided, and made a search for the critical width of fissure for possible penetrating of grout. This paper also deals with the mechanisms of clogging media for grouting in comparison with 1-dimensional model tests of bricks with a crack. With these investigation and chemical analysis of grout tips from above site, it was shown that clogging of cracks was mainly affected by sedimentation of grout.