

グラウチングの初期注入データによる注入セメント量の予測

独立行政法人土木研究所 正会員 山口嘉一 佐藤弘行 西岡正浩

1. はじめに

ダム基礎グラウチングでは、各注入区間でのルジオン値を指標として、セメントグラウトの配合(W/C)切替基準に従い、比較的貧配合から注入を開始し、規定注入量に達した後に、順次富配合へ切り替えるという方法で施工している。グラウチングにおいて、貧配合のセメントグラウトによる注入は注入時間の増大につながる可能性がある一方、富配合のセメントグラウトによる注入は、セメントグラウトが早期に岩盤亀裂内部で目詰まりを起こし、少注入になる懸念がある。近年、注入中のセメントグラウトの配合を任意に調節できるシステム¹⁾が開発され、注入状況の変化に応じ、適正配合のセメントグラウトを注入でき、結果的により効率の高い注入が実現できると考えている。本研究は、注入効率に関する基礎的な研究と位置づけ、既設ダムのグラウチングデータのうち、注入初期データから最終のセメント注入量を予測する方法を検討した。

2. 注入セメント量の予測方法

2.1. 分析対象データ

A ダムのコンソリデーショングラウチングの注入仕様を表-1に示す。これらのうち、表-2に示す条件により抽出した125孔を分析対象とした。

2.2. 配合切替時におけるグラウト配合の調整²⁾

グラウチングの配合切替は表-1(b)に示す配合切替基準に従い実施するが、注入中のセメントグラウトの流れを止めずに行うため、規定の配合切替時点よりも若干早い時点から次配合を混合し供給する必要がある。実際はグラウトミキサー内で徐々に濃度が増してゆく状況にある。分析生データは、この過程を反映していないため、図-1に示すように配合切替時点の前後100ℓで線形に配合が切替わるようにデータを調整した。

2.3. 粘性変換ルジオン値の算出方法

注入中のセメントグラウトの注入量から基礎岩盤の透水性を評価するために、粘性変換ルジオン値(以下、 μLu)を用いる。まず、既往の研究成果³⁾である各配合のセメントグラウトのせん断速度(以下、 Dw)とせん断力(以下、 τ_w)の相関を図-2に示す。この結果を用い、見掛け粘性(以

表-1 A ダムコンソリデーショングラウチング仕様

(a) 注入仕様 (b) 配合切替基準

区間長(標準)	5(m)
規定注入圧力	0.294(MPa)
最大注入速度	4(ℓ/min/m)以下
注入完了基準	0.2(ℓ/min/m) ダマ押し30(min)

配合	規定注入量(L),高炉B種 $\rho=3.05$
W/C	$Lu \leq 10$ $10 < Lu \leq 20$ $20 < Lu$
10	400
6	400
4	400
3	400
2	600
1	800
計	3,000

表-2 データ抽出条件

区間長	5 $L < 6m$ ^{注1)}
次数	パイロット孔, 1次孔, 2次孔
ルジオン値	5 $Lu < 30$
その他	透水試験及び水押し試験中に限界圧力が発生していない孔

注1)注入孔の角度が場所により若干異なるため、この範囲の中でばらついている。

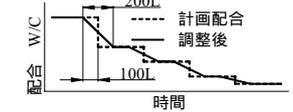


図-1 配合切替模式図²⁾

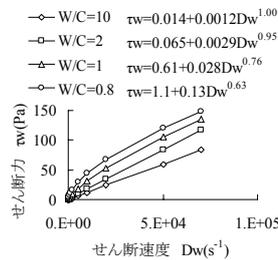


図-2 Dw - τ_w 相関図³⁾

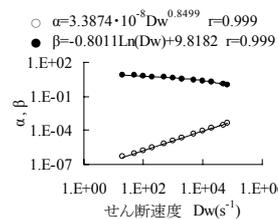


図-4 Dw - α , Dw - β 相関図

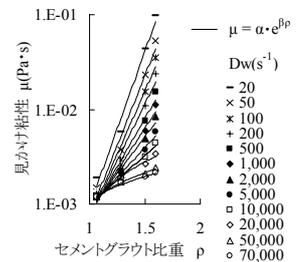
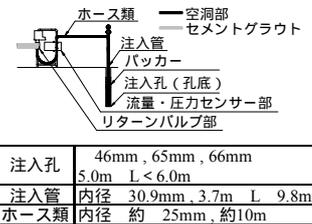


図-3 ρ - μ 相関図⁴⁾



注入孔	46mm, 65mm, 66mm
注入管	5.0m $L < 6.0m$
ホース類	内径 30.9mm, 3.7m L 9.8m 内径 約 25mm, 約10m

図-5 注入開始時の空洞部

下、 μ)とセメントグラウト比重(以下、 ρ)の相関図を描き図-3に示す。これらを Dw によりグルーピングし、既往の研究成果⁴⁾である近似式 $\mu = \alpha \cdot e^{\beta \rho}$ を得、 α と β を検出する。 Dw と α 及び、 Dw と β は、図-4に示すとおり近似でき、 Dw と ρ を設定することにより、 μ の算出が可能となった。岩盤亀裂中における Dw は地質条件や注入過程により大きく左右されるため、本研究においては、一律 $Dw=5000(s^{-1})$ と仮定して計算を行うこととした。セメントグラウトの単位注入量 $Q(\ell/min/m)$ 及び有効注入圧力 $P(MPa)$ から一点換算ルジオン値(以下、 Lu) $Lu=Q/P/0.98$ を算出し、この結果に μ を乗じて μLu を算出した。

2.4. 注入初期データの取り扱い

セメントグラウト注入前のリターンバルブ部から孔底(ホース類, 注入管, 注入孔)までの間は、空洞となっ

ており、主に透水試験や水押し試験後の残留水と地下水、あるいは空気が存在する。分析対象孔は、堤体打設面上からの施工であるため、ほとんどの孔の内部は、地下水あるいは、堤体コンクリートの養生水で満たされていた。この空洞の大きさは、各孔の条件により異なるが、図-5に示すように概ね 30ℓ 程度となっており、ばらつきはあるものの、注入開始から 5 分までの累積注入量の最大値がこれに相当する。従って分析に用いる初期注入データは、注入開始 5 分（以下、 t_5 ）から 10 分（以下、 t_{10} ）までのデータとした。

2.5. 初期注入データと注入セメント量の相関

注入開始 5 分後の μLu （以下、 $\mu Lu(t_5)$ ）と 10 分後の μLu （以下、 $\mu Lu(t_{10})$ ）の値を用いて、粘性変換ルジオン値勾配（以下、 $\gamma(t_{10}-t_5) = \{\mu Lu(t_{10}) - \mu Lu(t_5)\} / 5$ ）(1/分)を算出する。本研究では $\gamma(t_{10}-t_5)$ をグループ数 7 に分類し、単位注入セメント量（以下、 $\Sigma ce/m$ ）(kg/m)のうち、注入開始時（以下、 t_0 ）から t_5 までの注入量を除いた $\Sigma ce/m$ （以下、 $\Sigma ce/m(t_c-t_5)$ ）と $\mu Lu(t_5)$ の相関を図-6 に示す。各グループのデータは、 $\mu Lu(t_5) = \delta \ln\{\Sigma ce/m(t_c-t_5)\} + \varepsilon$ （以下、式(1)）で概ね近似できることがわかった。なお、 $\gamma(t_{10}-t_5) < -8$ のグループは、データ数が少ない上にばらつきが大きいいため分析対象から除外した。 $\gamma(t_{10}-t_5)$ と $\mu Lu(t_5)$ の関係を見ると、 $\gamma(t_{10}-t_5)$ が大きいグループほど $\mu Lu(t_5)$ は小さく、 $\gamma(t_{10}-t_5)$ が小さいグループほど $\mu Lu(t_5)$ は大きくなる傾向があることがわかる。

2.6. 注入セメント量の予測

式(1)から δ と ε を抽出し、 $\gamma(t_{10}-t_5)$ と δ 及び $\gamma(t_{10}-t_5)$ と ε の相関を描いた結果を図-7 に示す。この相関を用いて、 $\gamma(t_{10}-t_5)$ から δ と ε を算出し、さらに式(1)を用いて $\Sigma ce/m(t_c-t_n) = e^{\{\mu Lu(t_n) - \varepsilon\} / \delta}$ へと整理して、最終的に時々刻々の $\mu Lu(t_n)$ から $\Sigma ce/m(t_c-t_n)$ の予測を行った。

2.7. 予測結果

δ と ε は、初期注入データから算出しているが、これを任意の 5 分の差がある時点で適用して時々刻々の $\mu Lu(t_n)$ と $\gamma(t_{n+5}-t_n)$ から $\Sigma ce/m(t_c-t_0)$ を予測した結果を図-8 に示す。 $\Sigma ce/m$ 予測線は、注入データの実績 $\Sigma ce/m(t_n-t_0)$ と予測量 $\Sigma ce/m(t_c-t_n)$ の合計であり、 $\Sigma ce/m$ 実績線は、 $\Sigma ce/m$ の累積としている。全般に、 $\Sigma ce/m(t_5)$ の予測値より注入中盤での予測値が少なくなる傾向があり、比較的予測精度が高いデータは、 $\mu Lu(t_n)$ と $\gamma(t_{n+5}-t_n)$ が大きく、配合切替を含まない比較的 $\Sigma ce/m(t_c-t_n)$ が少ないデータに多く、 $\gamma(t_{n+5}-t_n)$ が水平に近いデータや、配合切替を含むデータは予測精度

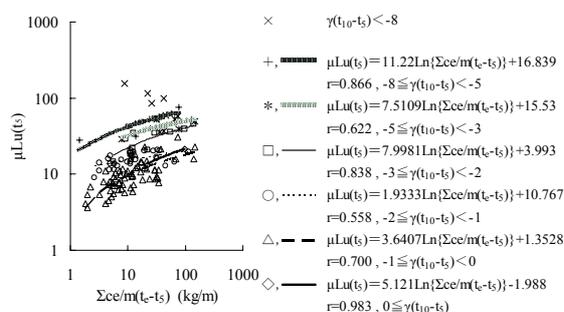


図-6 $\Sigma ce/m(t_c-t_5)$ - $\mu Lu(t_5)$ 相関図

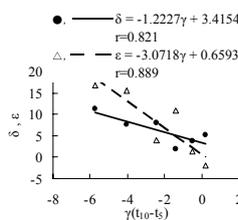


図-7 δ - $\gamma(t_{10}-t_5)$,
 ε - $\gamma(t_{10}-t_5)$ 相関図

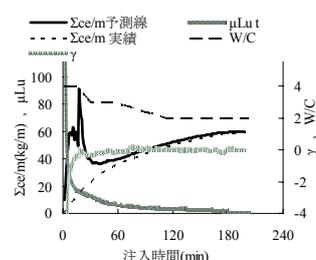


図-8 注入予測チャート

が低い傾向にある。

3. まとめ

今回の研究において、ある程度まとまった数量の初期注入データを分析することにより、 $\Sigma ce/m$ を予測できる可能性があることがわかった。注入効率を高めるためには適正な配合を選定する必要があると考えられ、時々刻々の $\Sigma ce/m$ のうち、予測値と実績値及び μLu を比較することにより、 $\Sigma ce/m$ の実績値が予測値よりも多い場合は適合として、逆転する場合は不適合とするなどの方法が考えられる。しかし、現状は、セメント注入量の予測精度が低く、多くの実績データが必要となり、また地質条件や改良状況及び D_w の設定によりパラメータも変化する等の問題が考えられるため、今後はこれらを踏まえ、更なる研究を進めていきたい。

参考文献

- 1) 前田建設工業(株), 日特建設(株): Multi CO-MIX グラウチング用セメントミルク配合任意変更装置 (財)土木研究センター建設技術審査証明報告書, 2005.
- 2) 山口嘉一, 佐藤弘行, 阿部智彦: ダム基礎グラウチングの初期注入データの分析に基づく注入過程の推定, 第35回岩盤力学シンポジウム, 講演論文集 CD, 2006.
- 3) 谷 智之, 内田善久: セメントミルクの濃度と注入特性の関係について, ダム工学, Vol.6, No.3, pp.175-186, 1999.
- 4) 最新地盤注入工法技術総覧, 最新地盤注入工法総覧編集委員会: pp.501-503, 1997.