

ダム基礎グラウチングの効率的注入に関する研究

研究予算：運営費交付金（一般勘定）

研究期間：平 18～平 20

担当チーム：ダム構造物チーム

研究担当者：山口嘉一、佐藤弘行

【要旨】

環境保全やコスト縮減のために、従来は掘削除去されていたような地盤をダム基礎とせざるを得ない場合が多くなっている。このような状況を踏まえて、2003年7月に「グラウチング技術指針」が改訂され、計画や効果の判定に関しては適切な合理化が達成された。しかし、注入の制御システムの合理化については未検討であったため、多様化する地質条件に応じた適切な注入圧力、配合切り替えなどをリアルタイムで制御する、効率的なダム基礎グラウチング方法の開発が求められている。

本研究では、上記の要請に応えるため、グラウチングにおけるリアルタイムの注入データを用いて、グラウトの効果的な注入を規定する評価指標について検討した。また、得られた評価指標を用いてリアルタイムで注入を制御する、効率的なグラウチング制御方法について検討した。本報文では、これらの成果をとりまとめた。

キーワード：ダム基礎グラウチング、ルジオン値、セメントグラウト、配合切替、単位注入セメント量

1. はじめに

環境保全やコスト縮減のために、従来は掘削除去されていたような地盤をダム基礎とせざるを得ない場合が多くなっている。このような状況を踏まえて、土木研究所においてダム基礎グラウチングについての重点研究（「ダム基礎グラウチングの合理的計画設計法に関する調査」（平成 13～17 年度））を実施し、その成果である地盤性状に応じた透水性評価方法、グラウチング範囲の効果的な設定方法、最終次数孔などによる合理的な効果判定方法などを反映する形で「グラウチング技術指針・同解説」¹⁾が 2003 年 7 月に改訂され、計画や効果の判定に関しては適切な合理化が達成された。しかし、グラウチング時のリアルタイムの注入データに基づく注入圧力の変化やグラウト配合の切り替えなど施工における制御システムについては未検討であるため、高透水性岩盤や割裂注入された軟岩盤におけるグラウトの改良範囲外への大量流出、不適切な配合による長時間注入などの問題が発生し、効率的な注入が達成できないだけでなく、流出グラウトや廃棄グラウトの大量発生による周辺環境への影響も懸念されている。

いま、ダム基礎グラウチングのセメントグラウト配合は、基礎地盤の透水性の指標であるルジオンテストあるいは水押し試験から得られたルジオン値 Lu に応じて設定される配合切替基準に従っている¹⁾。グラウ

トの配合は、水とセメントの質量比 W/C で表され、一般に $1 \leq W/C \leq 10$ の範囲が用いられ、極めて高透水性の地盤に対しては $W/C=0.5$ 程度の富配合を用いることもある¹⁾。基礎地盤の透水性に対して貧配合の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、富配合のグラウトによる注入は、グラウトが早期に岩盤の割れ目内部で目詰まりを起こし、少注入になる懸念がある。従来から、このグラウト配合における「Thick or thin ?」は大きな課題であるが、いまだ明快な技術的回答が得られていない^{2,3)}。

従来の配合切替は、比較的貧配合のグラウトから注入を開始し、各配合が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実施されている¹⁾。近年、注入中のグラウト配合を短時間に調節できるシステム^{4,5)}（以下、グラウト配合逐次制御装置）が開発されたため、注入中の基礎地盤における透水性の変化に応じた配合調節が可能となった。そのため、地質条件に応じた適切な注入圧力、配合切り替えなどをリアルタイムで制御する、効率的なダム基礎グラウチング方法の開発が求められている。

本研究では、上記の要請に応えるため、グラウチング時のリアルタイムの注入データを用いて、グラウトの効果的な注入を規定する評価指標について検討する。また、得られた評価指標を用いてリアルタイムで注入を制御する、効率的なグラウチング制御方法について

検討する。

2. 分析対象のグラウチングの実績注入データ

2.1 ダムサイトの地質状況

分析対象としたダムサイトの基礎地盤は、中生代白亜紀の領家花崗岩、主に粗から中粒黒雲母花崗岩で構成されている。これに、細粒花崗岩およびアプライト(半花崗岩)の岩脈が貫入している。また、花崗岩の一部に、有色鉱物が緑色に変質した緑色花崗岩がある。割れ目系は比較的高角度で上下流方向の走向を有している。

2.2 対象データ

分析には、コンソリデーショングラウチングのパイロット孔から2次孔までの実績データのうち、ルジオンテストおよび水押し試験結果が $5 \leq Lu \leq 30$ の範囲で注入中に限界圧力等の異常が発生していないデータから選定した。注入仕様は表-1に示すとおりである。グラウチングの最大圧力は、孔口部分で一律0.294(MPa)としているなど、一般的な仕様であるが、 $W/C=2$ から $W/C=1$ への切り替え時点の比重差は、他の配合切替時点と比較するとかなり大きくなっている。

改訂以前のグラウチング技術指針⁹⁾に従い施工されたダムでは、コンソリデーショングラウチングでパイロット孔を実施した事例が有り、分析対象ダムにおいても基礎地盤の透水性や地質状況を確認するためにパイロット孔を16(m)格子で施工していた。

$Lu < 5$ の透水性の地盤では、通常の配合切替方式でも単一配合で完了するケースが多く、配合切替を早く行うことが、必ずしも注入効率の向上につながらないと判断した。また $30 < Lu$ の透水性の地盤では、注入速度が速いため、通常の配合切替方式でも、比較的短時間で富配合に達するため、注入時間の増大にはなりにくいと判断した。 $Lu = \infty$ などと表示される極端に高透水を示す注入区間では、以下に示す問題が発生し易いと考えられる。一般にグラウチングの1ステージ(st)当たりの注入区間長Lは標準 $L=5(m/st)$ と設定される場合が多い。また、一般にグラウトの最大注入速度は、注入区間1m当たり $4(l/min/m)$ あるいは、1ステージ当たり $20(l/min/st)$ と設定されている。このため、極めて高透水を示す注入区間では、1ステージ当たり1本か2本程度の極わずかな高透水性の割れ目に対して、大半のグラウトが流れ込むように注入され、低透水性の割れ目の注入速度は極めて遅くなったり、割れ目の透水性に対して、グラウト配合が早期に富配合になったりして、注入孔の外周部付近で早期に目詰まりが発生し易くな

ると考えられる。このような注入状況では、注入孔周辺にグラウトが注入されていない割れ目を取り残してしまう可能性があり、注入孔の間隔や注入区間長を慎重に検討するべきと考えられる。

配合切替の効率化を図ることが本研究の主目的であるため、配合切替を含むデータが主対象となる。しかし、単一配合データについても、注入閉塞の管理指標を把握するデータとしては活用できる。これらを踏まえて、表-2に示す配合切替を含む63データと、配合切替を含まない48データを分析対象とした。配合切替を含むデータは、対象ダムにおける注入実績の整理において設定していた単位注入セメント量(以下、Ce)の区分を行い、各区分に該当するデータから、後述する8データを選定した。配合切替を含まないデータは、 $W/C=10$ が32データ、 $W/C=6$ が12データ、 $W/C=4$ が4データとなった。

表-1 注入仕様
(a) 概要

区間長	$5.0(m) \leq L \leq 5.9(m)$ ※1)
規定注入圧力	$P_0=0.294(MPa)$ (P_0 : 孔口圧力)
最大注入速度	$Q \leq 4.0(l/min/m)$
注入完了基準	$Q \leq 0.2(l/min/m)$ ダメ押し30(min)
注入材料	高炉B種セメント (比重 $\gamma_{ce}=3.05$)
改良目標値	$Lu=5$

※1) 注入孔の傾斜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。

(b) 配合切替基準

配合 W/C	規定注入量(Q)			グラウト 比重 γ
	$Lu \leq 10$	$10 < Lu \leq 20$	$20 < Lu$	
10	400			1.07
6	400	400		1.11
4	400	400	400	1.16
3	400	400	400	1.20
2	600	600	600	1.29
1	800	1,200	1,600	1.51
計	3,000	3,000	3,000	

高炉B種セメントの比重 $\gamma_{ce}=3.05$ 。

表-2 データ概要

(a) 配合切替を含むデータ

Ce (kg/m)	Lu	急激な閉塞		計 (データ)
		有り(データ)	無し(データ)	
Ce ≤ 25	Lu ≤ 10	10 ①	11	21
	10 < Lu ≤ 20	1 ②	9	10
	20 < Lu	0	0	0
25 < Ce ≤ 50	Lu ≤ 10	2 ③	1	3
	10 < Lu ≤ 20	7 ④	6	13
	20 < Lu	2 ⑤	1	3
50 < Ce	Lu ≤ 10	2 ⑥	0	2
	10 < Lu ≤ 20	5 ⑦	1	6
	20 < Lu	4 ⑧	1	5
合計		33	30	63

①~⑧：表-2(b)に記載のデータに対応。

(b) 配合切替を含むデータからの選定 8 データ

孔番	水押し 試験Lu	Ce (kg/m)	W/C※1)	
①	C12-A4-2820	9.06	12.5	10→6
②	C19-A8-1620	19.35	19.5	6→4
③	C10-A4-1620	5.72	35.3	10→4
④	C16-P4-3400	16.87	43.3	6→3
⑤	C20-P6-1800	21.01	32.4	4→3
⑥	C10-A8-4420	8.75	115.9	10→1
⑦	C09-A6-3620	20.00	99.3	6→2
⑧	C11-A2-1010	20.05	76.5	4→2

※1) 開始計画配合→終了計画配合。

(c) 単一配合データ

W/C	Ce (kg/m)	急激な閉塞		計 (データ)
		有り(データ)	無し(データ)	
10	1.7 ≤ Ce ≤ 10.0	25	7	32
6	3.2 ≤ Ce ≤ 21.4	9	3	12
4	15.1 ≤ Ce ≤ 33.8	4	0	4
合計		38	10	48

3. グラウトの効率的注入を規定する評価指標の分析

3.1 分析の過程

グラウトの効率的な注入を規定する評価指標の検討として、後述する補正後のグラウト配合データと実際の単位注入量 Q から、時々刻々の累積単位注入セメント量(以下、 C_e)と時々刻々のセメント注入速度 V_{ce} を算出した。さらに、注入中の基礎地盤における透水性の変化を評価するために、グラウトの見かけ粘性を考慮した粘性変換ルジオン値 $\mu Lu^{(註)} \mu Lu$ は一つの記号である。) ⁷⁾ を後述する方法により算出した。

図-1 に示す分析の過程に従って、 $\mu Lu-C_e$ 相関図と $V_{ce}-C_e$ 相関図を描き、注入の閉塞過程を分析した。分析の過程で、 $\mu Lu-C_e$ 曲線の注入中盤は直線状を示すことが明らかとなったため、直線両端部の勾配変化点について分析および考察を行った。後述する $\mu Lu-C_e$ 曲

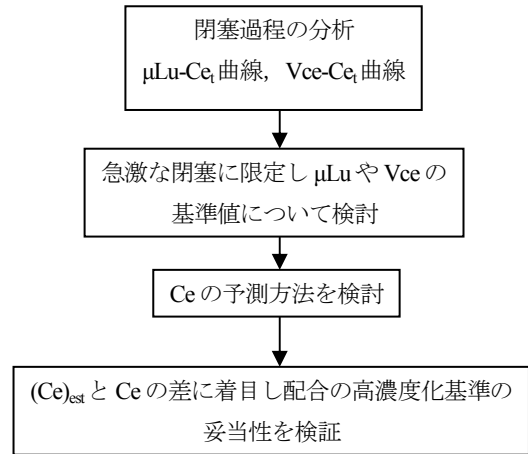


図-1 分析の過程

線の直線性を利用して、適性配合による簡易な C_e の予測方法とグラウト配合逐次制御装置を用いた場合の配合の高濃度化基準を検討し、 C_e を用いた C_e の予測値 $(C_e)_{est}$ と C_e の差に着目して、配合の高濃度化基準の妥当性について検証した。

3.2 粘性変換ルジオン値の算出方法

(1) グラウト配合データの補正

グラウチングは、孔口循環方式で実施しており、配合切替は表-1(b)に示す配合切替基準に従っている。しかし注入中は、グラウトの流れを止めずに配合を切り替えるため、規定の配合切替時点よりも若干手前の時点から次配合を混合している。従って、実際の配合はグラウトミキサー内で徐々に増加する状況にあるが、分析データは、計画配合を記録しているため、この過程を反映していない。計画配合と実注入配合の差が分析結果に影響するため、下述の方法で配合データを補正した。

分析対象ダムのコソリデーショングラウチングは図-2 に示すとおり、中央プラント方式で、注入プラントでは、上下二層式のグラウトミキサー(以下、ミキサー)を使用していた。中央プラントの1回当りのグラウト練り上げ量は、一般に 200(t)であり、通常はこれを1バッチと称し、各配合の規定量バッチ数に到達するまで練り上げる。練り上げられたグラウトは、1バッチ毎に注入プラントのミキサーへ圧縮空気で作送され、ミキサーの上層に一旦貯留される。そして、ミキサー下層のグラウト残量を確認しながら、徐々に上層から下層へ供給されるため、配合は徐々に切り替わる。また、ダム基礎グラウチングは孔口循環方式で行うため、ミキサー下層からリターンホースの区間は常にグ

ラウトが循環している。注入プラントの設置位置は、ダム本体の工程と注入孔までの距離が極端に離れないこと等を考慮して、河床部の上流側や下流側、フーチング上、法面の小段などとしている。ミキサーから注入孔ま

での間は、サプライホースとリターンホースで接続されるため、施工条件により異なるが、平均的なホースの総延長は200(m)から300(m)程度と考えられる。分析対象ダムで使用していたホースの内径は25(mm)であったため、ホース総延長を200(m)と想定すると、ホース内部のグラウト量は約98(ℓ)となる。また、注入中のホース内部に空気を混入させないためには、ミキサー下層に最低でも50(ℓ)程度のグラウトが必要となることから、循環に必要なグラウトの最低量は約148(ℓ)程度となる。ミキサー下層に次配合を供給する時点は、グラウトの注入速度により異なるが実務上の余裕を考慮すると、計画配合切替時点よりも200(ℓ)程度手前の時点と考えられる。本分析では、特にW/C=10からW/C=3にかけて、規定注入量400(ℓ)の配合切替頻度が多いため、これを重視して図-3に示すとおり計画配合切替時点の前後200(ℓ)以下、±200(ℓ)で線形に切り替わるようにW/Cを補正した。

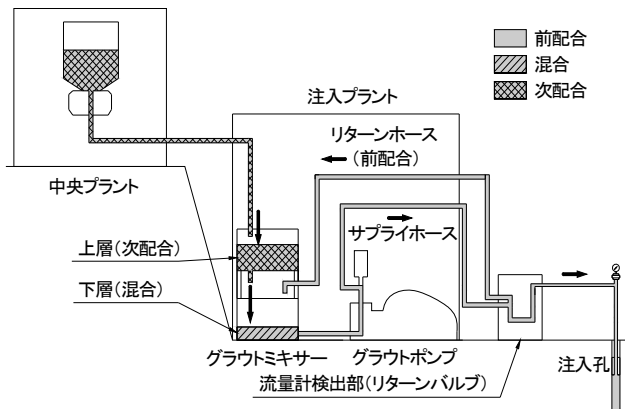


図-2 グラウティング方式(孔口循環方式)の模式図

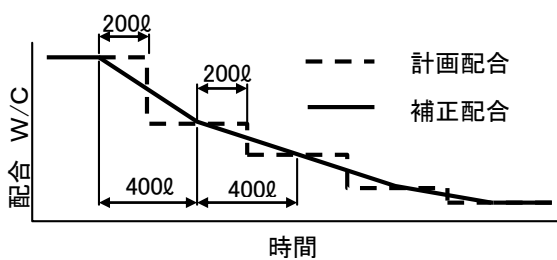
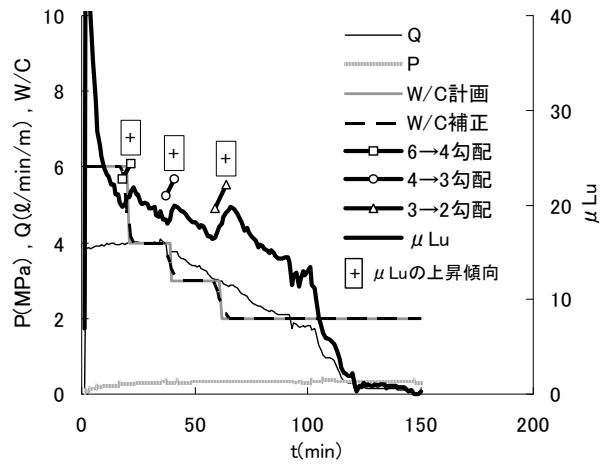


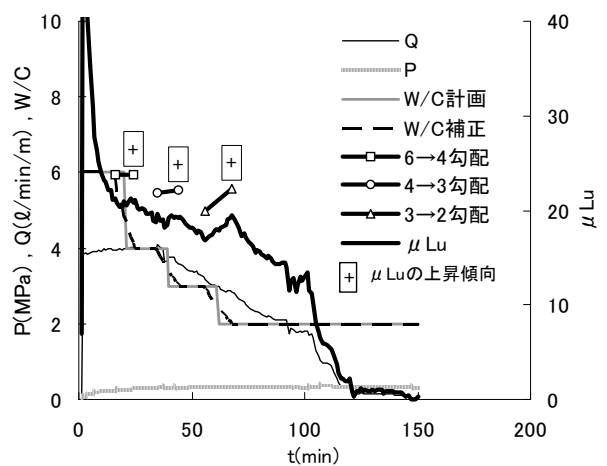
図-3 配合切替補正の模式図

(2) グラウト補正配合データの検証

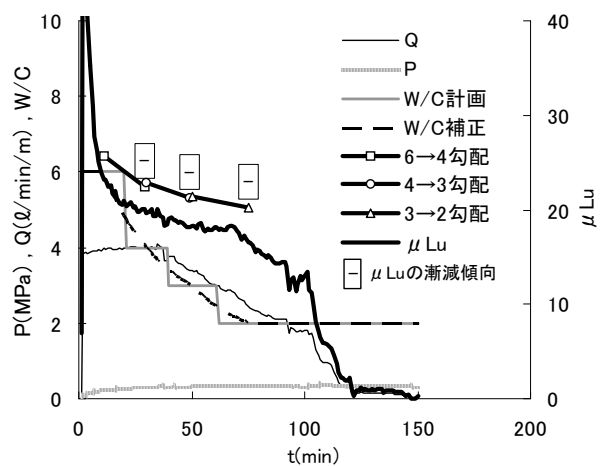
図-4に実績注入データを用いて、配合補正範囲を計画切替時点の±50(ℓ), ±100(ℓ), ±200(ℓ)の3通りとして計算し



(a) 配合補正 [±50(ℓ)]



(b) 配合補正 [±100(ℓ)]



(c) 配合補正 [±200(ℓ)]

図-4 注入データの経時変化 (C09-A6-3620)

た経時データを示す。 μLu の算出方法は後述するが、 $\mu Lu-Ce$ 曲線から配合補正部分を抽出し、直線で近似させ、この勾配を比較した。配合を $\pm 50(l)$ や $\pm 100(l)$ で補正したデータでは、限界圧力が発生していない状況にも関わらず、配合切替部分の μLu が上昇傾向を示すなど不自然な挙動を示していたが、 $\pm 200(l)$ で補正したデータでは、全て漸減する傾向を示し概ね良好な結果が得られたと判断したため、本分析においては $\pm 200(l)$ で補正することとした。しかし、グラウト注入速度が遅い場合や、注入孔と注入プラントの位置が近い場合は、ミキサー下層での混合開始時期が計画切替時点に近づくため補正後のデータは若干手前の時点から富配合となっている可能性が考えられる。また、 $W/C=2$ や $W/C=1$ などの同一配合の計画バッチ数が3以上ある場合は、3バッチ目以降の実注入配合が補正後の配合よりも、緩やかに増加していると考えられる。

(3) 有効注入圧力の補正

注入圧力データとしては、注入管の地上部分に取り付けた圧力計のデータが記録されている。試験区間の有効圧力の算出にあたっては、地下水圧補正、管内損失圧力補正の他に、グラウト比重を考慮した補正も施した。

(4) 粘性変換ルジオン値

既往の研究成果⁸⁾の各グラウト配合のせん断速度 D とせん断応力 τ の相関を図-5に示す。これらの結果を用いて、グラウトの見掛け粘性 μ とグラウト比重 γ の相関図を描き図-6に示す。これらを D により分類し、既往の研究成果⁹⁾として $\mu = \alpha \cdot e^{\beta \cdot \gamma}$ を得て、 α と β を検出する。 D と α および、 D と β は、図-7に示すとおり高い精度で近似することが可能なため、 D と γ を設定することにより μ を得ることができる。

基礎地盤の割れ目における D は、割れ目の形状・寸法が不明であることに加えて注入の閉塞過程の影響を受け、さらに D の算出位置も定まらないことから、以下の方法で仮定した。分析対象サイトの地質は、 C_M から C_H 級で施工範囲が比較的浅い部分であることを考慮して、採取コア長の平均として求めた割れ目間隔を一律 $7(\text{cm})$ とした円柱モデルを想定し、 D の算出位置を注入孔中心から半径 $25(\text{cm})$ の箇所とした。ダルシー則を適用して割れ目幅 t を算出し、既往の研究結果 ($D=6 \cdot Q / (t^2 \cdot B)$ 、 B : 平行平板の流路幅⁸⁾) に基づき D を計算し、分析対象 111 データの平均値を用いることとした。

ルジオンテストおよび水押し試験から得られる Lu は、定常浸透状態に近づいた時点での透水性と考えら

◇ $W/C=10$	$\tau = 0.014 + 0.0012D^{1.00}$
□ $W/C=2$	$\tau = 0.065 + 0.0029D^{0.95}$
△ $W/C=1$	$\tau = 0.61 + 0.028D^{0.76}$
○ $W/C=0.8$	$\tau = 1.1 + 0.13D^{0.63}$

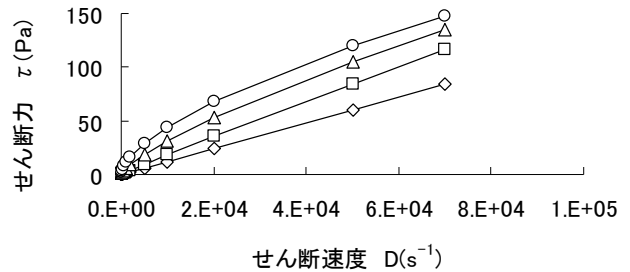


図-5 D- τ 相関図

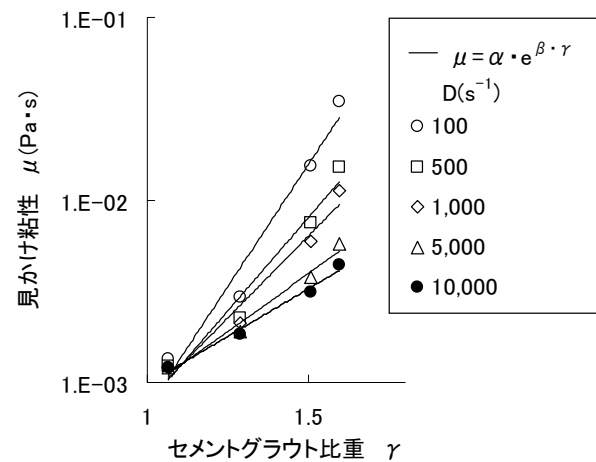


図-6 $\gamma-\mu$ 相関図⁷⁾

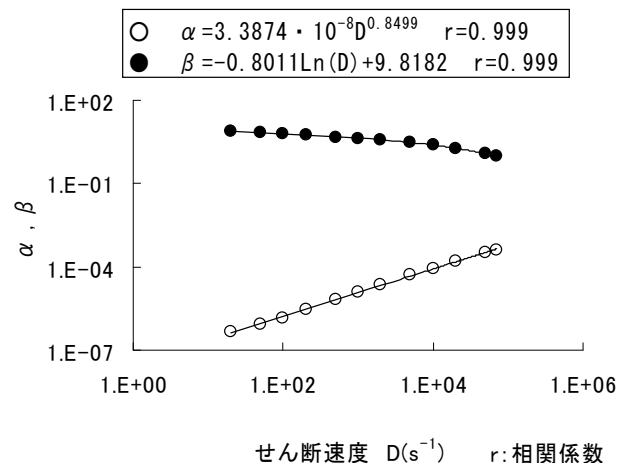


図-7 D- α 、D- β 相関図

れる。計算には、有効注入圧力 P を一律 $P=0.294(\text{MPa})$ と仮定して、各データの Lu から算出した単位注入量 Q を用いている。ただし、有効注入圧力は、地下水位補正、

管内損失圧力補正、比重補正および粘性を考慮せず、グラウト注入の規定注入圧力 P_0 と有効注入圧力 P が等しいと見なして設定している。これらのデータと、注入孔の設計値を入力物性値としてせん断速度 D を計算したところ、 $4,469(s^{-1}) \leq D \leq 7,971(s^{-1})$ の範囲となり、平均値が $D=5,443(s^{-1})$ となったため、一律 $D=5,000(s^{-1})$ と仮定した。

μLu の算出には、グラウトの単位注入量 $Q(\ell/min/m)$ と、これに対応する有効注入圧力 $P(MPa)$ と原点を用いて換算ルジオン値 $Lu=Q/P \cdot 0.98$ を算出し、この結果にグラウトの粘性と水の粘性の比を乗じたものを粘性変換ルジオン値 μLu と定義した。

4. 分析結果

4.1 $\mu Lu-Ce_t$ 曲線の勾配変化点

図-8 に分析結果の一例(C10-A8-4420)を示す。図-8(a)は、時々刻々のデータを用いて描いた $\mu Lu-Ce_t$ の相関図であるが、この注入データは、配合切替を含むデータのうち、比較的 Ce が多いものである。点 A は注入開始点で、点 E が注入終了点である。点 B と点 D は、 $\mu Lu-Ce_t$ 曲線の勾配変化点を示し、その間はほぼ直線状を示しており、点 D を境に、急激に閉塞している。

(1) $\mu Lu-Ce_t$ 曲線の初期勾配変化点

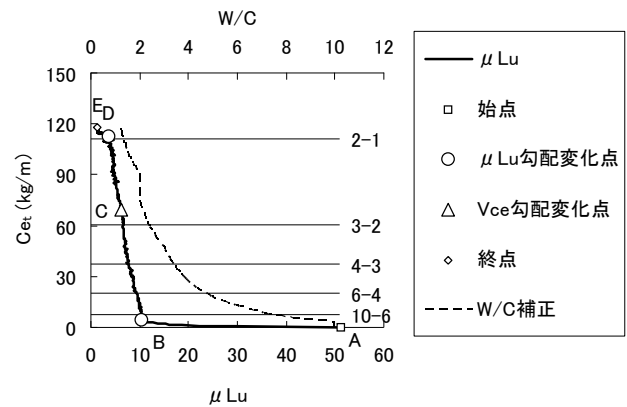
図-8(c)にグラウト注入前の水押し試験の時々刻々の $P-Q$ 曲線¹⁰⁾と注入データの時々刻々の $P-Q$ 曲線を示す。注入データの圧力は、地下水圧補正とグラウト比重の補正を行い、流量は、グラウトの見かけ粘性を考慮して水を注入した場合の粘性変換流量 $\mu Q^{(注)} \mu Q$ は一つの記号としている。 $\mu Q = \mu Lu \cdot P / 0.98$ に補正した。水押し試験データは、非常浸透状態や目詰まりの影響¹¹⁾¹²⁾¹³⁾¹⁴⁾を受けている可能性はあるが、水押し試験の最大圧力段階の最終データと、 $\mu Lu-Ce_t$ 曲線の初期勾配変化点 B がほぼ一致していることがわかる。

表-3 に配合切替を含む 8 件のデータの、初期勾配変化点 B について分析した結果を示す。従来の配合切替基準に基づく注入開始時点の配合(以下、注入初期配合) $W/C=6$ の 1 データと $W/C=4$ の 1 データで注入圧力が上昇中であり、定常浸透状態を達成していないが、他のデータについては、点 B の発生時点は、注入開始後 10 分から 22 分経過した時点となっており、規定注入圧力に到達していた。注入に先立ち実施したルジオンテストおよび水押し試験の Lu と点 B の μLu を比較すると、極端な差が見られないため、試験における計測や μLu の評価精度を考慮すると点 B は定常浸透状態を達成しつつある時点であり、定常浸透状態の到達度は、

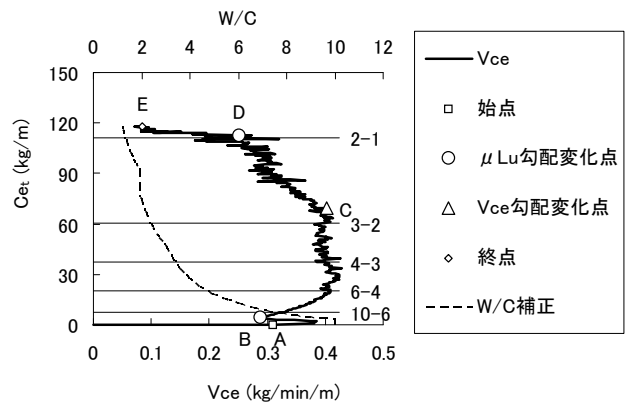
ルジオンテストおよび水押し試験の最大圧力時点と同程度と考えられる。

(2) $\mu Lu-Ce_t$ 曲線の末期勾配変化点

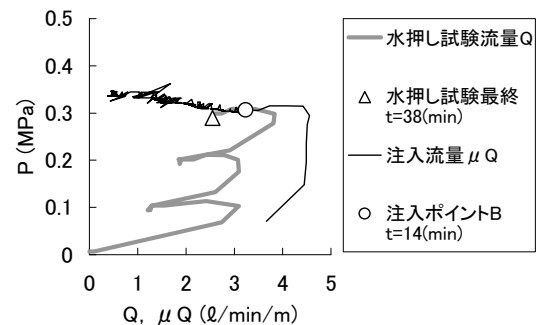
図-8(a)の点 B-D 間は配合切替を伴い、効率良く注入が進行しているが、注目すべきは、グラウトが富配合へ変化しても $\mu Lu-Ce_t$ 曲線の勾配は大きく変化せず、ほぼ、その勾配を維持していることである。この区間は、注入孔周辺の透水性に対して適正配合ないしはそれよりも貧配合のグラウトの注入である可能性が考えられる。



(a) $\mu Lu-Ce_t$ 相関図



(b) $Vce-Ce_t$ 相関図



(c) 注入と水押し試験の $P-Q$ 曲線比較

図-8 C10-A8-4420 分析結果

表-3 配合切替を含むデータの初期勾配変化点の状況

孔番	水押し試験Lu	μLu	t (min)	$(\mu Lu - Lu)/Lu$	W/C※1)	P
① C12-A4-2820	9.06	7.37	10	-19%	10→6 10	規定圧
② C19-A8-1620	19.35	17.45	16	-10%	6→4 6	規定圧
③ C10-A4-1620	5.72	5.42	12	-5%	10→4 10	規定圧
④ C16-P4-3400	16.87	17.21	14	2%	6→3 5.78程度	規定圧
⑤ C20-P6-1800	21.01	18.31	15	-13%	4→3 4	昇圧中
⑥ C10-A8-4420	8.75	10.34	14	18%	10→1 9.39程度	規定圧
⑦ C09-A6-3620	20.00	20.65	18	3%	6→2 5.04程度	昇圧中
⑧ C11-A2-1010	20.05	20.44	22	2%	4→2 3.25程度	規定圧

※1) 上段: 開始計画配合→終了計画配合。
下段: 初期勾配変化点Bにおける補正後の配合。

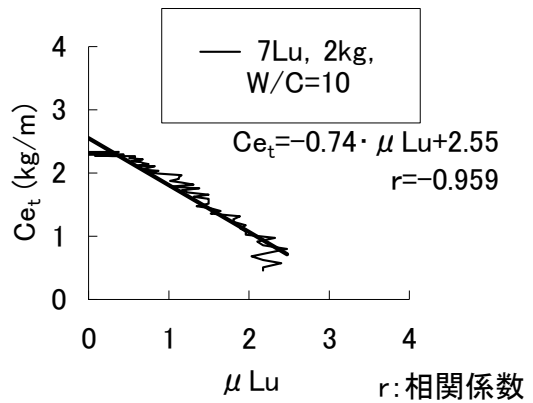
点 D-E 間の勾配は点 D で急激に変化し、その後注入が完了している。点 D が発生した要因としては、グラウト配合が適性配合より富配合であったために急激な閉塞が発生した可能性が考えられる。この場合の適性配合は点 D よりも貧配合の範囲と考えられ、高効率の注入を行うためには、点 D が発生する以前にグラウト配合の富配合への切替を取りやめる必要性が考えられる。

(3) Vce-Ce_t 曲線の勾配変化点

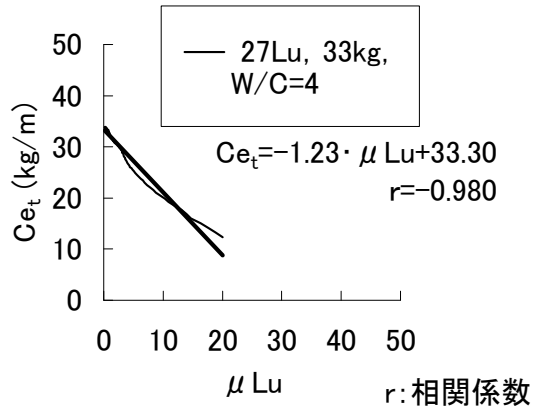
図-8(b)に Vce-Ce_t 相関図を示す。点 A、B、D、E は、それぞれ図-8(a)と同じ時点のデータである。点 C は、Vce-Ce_t 曲線の勾配が急激に減少した時点であり、点 D よりも手前で発生している。従って、Vce-Ce_t 曲線の勾配変化点が表れた時点で、グラウトの配合増加を取りやめることにより、 $\mu Lu-Ce_t$ 曲線の E が直線 BD の延長線上の低透水側へ移動する可能性が考えられる。

4.2 急激な閉塞が発生していないデータの分析

単一配合で注入が完了したデータのうち、急激な閉塞が発生していないデータを選定し、さらに $\mu Lu-Ce_t$ 曲線の初期勾配変化点 B から注入終了までのデータを抽出して $\mu Lu-Ce_t$ 曲線を描く。各データは、ほぼ直線状を示すため、基礎地盤の透水性に対して適性配合から貧配合の範囲のグラウトによる注入では、急激な閉塞が発生しないと考えられる。この一例を図-9 に示す。各データの $\mu Lu-Ce_t$ 曲線を直線で近似させ、相関係数 r を算出すると W/C=10 が $-0.994 < r < -0.762$ 、W/C=6 が $-0.999 < r < -0.863$ 、W/C=4 が $-0.980 < r < -0.975$ となっていた。図-10 に、全データの相関係数の度数分布を示す。全 38 データ中 34 データが $-1 < r < -0.9$ の範囲とな



(a) 単一配合 W/C=10 データ



(b) 単一配合 W/C=4 データ

図-9 単一配合 $\mu Lu-Ce_t$ 相関図

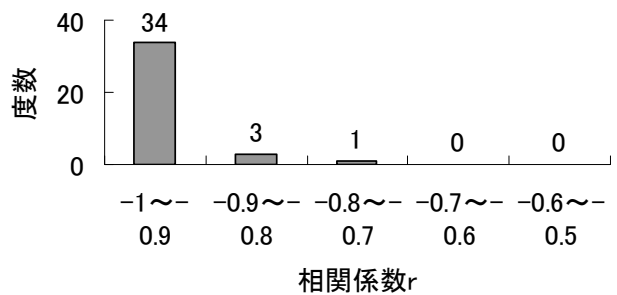


図-10 単一配合データにおける相関係数の度数分布

っており、極めて相関性が高い傾向を示している。各 $\mu Lu-Ce_t$ 曲線の勾配 δ について、配合毎に平均値を算出し、切片については各配合の中間値として図化すると、図-11 のとおりとなる。勾配 δ は $-1.24 \leq \delta \leq -0.86$ の範囲となり、配合の違いによるばらつきは比較的小さかった。

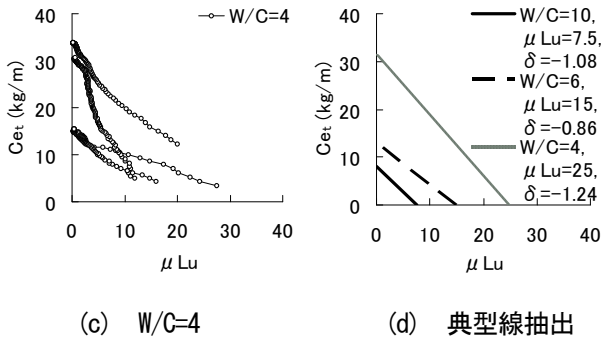
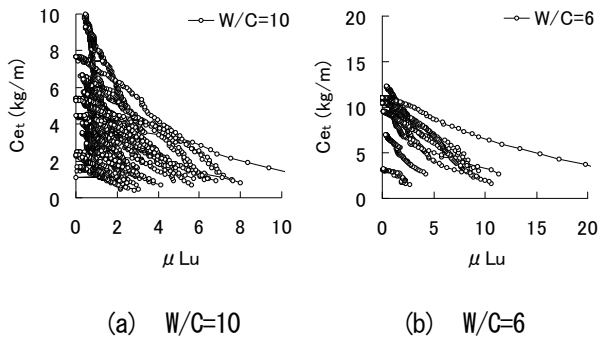


図-11 単一配合 $\mu\text{Lu}-\text{Ce}_t$ 相関図

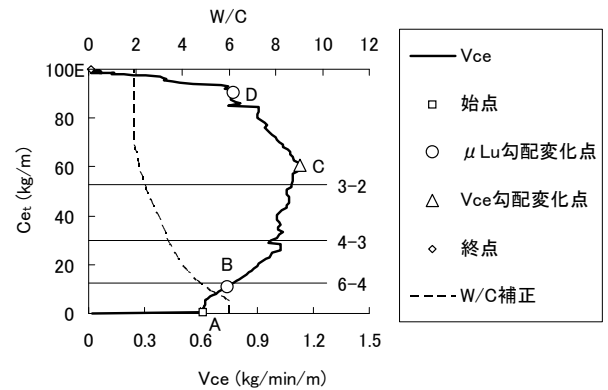
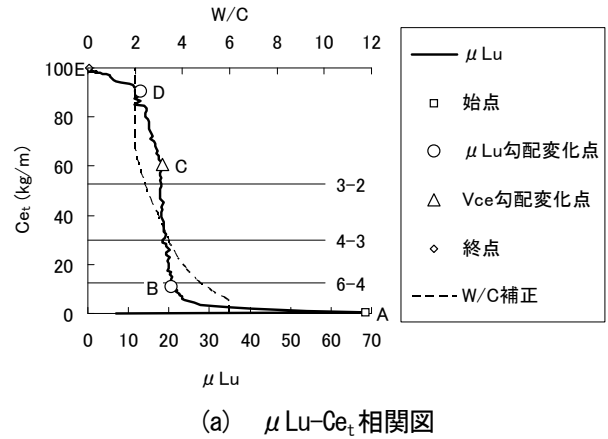


図-12 C09-A6-3620 分析結果

4.3 急激な目詰まりによる閉塞

(1) 急激な閉塞が発生した実績注入データ

図-12に配合切替を含むデータのうち、急激な閉塞が発生したデータの一例(C09-A6-3620)を示す。W/C=6で注入を開始し、図-12(a)の $\mu\text{Lu}-\text{Ce}_t$ 曲線によると初期勾配変化点Bが表れた後は、ほぼ直線状を示していたが、点D(概ね $\mu\text{Lu}=13$)で急激に閉塞している。図-12(b)のVce- Ce_t 曲線によると、注入開始から点CまではVceが上昇傾向を示していたが、点Cを境に急激に減少している。点Cは、計画配合をW/C=3からW/C=2へ切り替えた直後であり、富配合に切り替えたために $\mu\text{Lu}-\text{Ce}_t$ 曲線の勾配 δ が変化した可能性が考えられる。

(2) 急激な閉塞が発生した時点のW/Cと μLu の相関

図-13に配合切替を含むデータと単一配合データを用いて、急激な閉塞が発生した時点の μLu (以下、 $(\mu\text{Lu})_{\text{RC}}$)と同時点のW/C(以下、 $(\text{W/C})_{\text{RC}}$)を抽出して描いた $(\text{W/C})_{\text{RC}}-(\mu\text{Lu})_{\text{RC}}$ 曲線を示す。6 \leq ($\text{W/C})_{\text{RC}}$ の範囲では、 $(\mu\text{Lu})_{\text{RC}} \leq 2$ 程度と透水性が小さいが、配合切替がなされこれよりも $(\text{W/C})_{\text{RC}}$ がさらに富配合となった場合は、 $(\mu\text{Lu})_{\text{RC}}$ が増加する傾向を示している。

(3) 急激な閉塞が発生した時点の透水性の変化率

図-14に配合切替を含むデータと単一配合データを用いて、 $(\mu\text{Lu})_{\text{RC}}$ を水押し試験のLuで除した $(\mu\text{Lu})_{\text{RC}}/\text{Lu}$ と $(\text{W/C})_{\text{RC}}$ の相関図を示す。6 \leq ($\text{W/C})_{\text{RC}}$ の範囲の $(\mu\text{Lu})_{\text{RC}}/\text{Lu}$ は、40%以下となっており、急激な閉塞

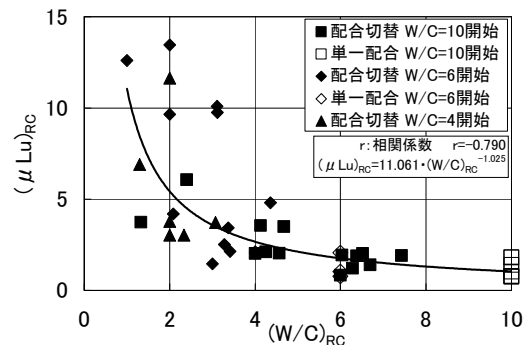


図-13 $(\text{W/C})_{\text{RC}}-(\mu\text{Lu})_{\text{RC}}$ 相関図

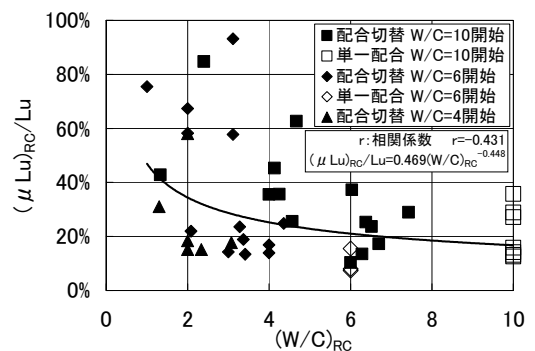


図-14 $(\text{W/C})_{\text{RC}}-(\mu\text{Lu})_{\text{RC}}/\text{Lu}$ 相関図

が発生する透水性が初期透水性に比べてかなり小さいことがわかる。W/C<6 の範囲の $(\mu Lu)_{RC}/Lu$ は最大で93%までの範囲に分布しており、急激な閉塞が発生する透水性と初期透水性の差が比較的小さいケースが存在することがわかる。急激な閉塞が発生した時点の透水性が大きい場合は、注入孔の当該ステージ周辺に、未改良範囲を取り残していることが考えられ、注意が必要である。

5. 配合の高濃度化基準

5.1 注入開始配合

分析対象ダムにおける基礎地盤を考慮して、グラウト配合逐次制御装置の使用を想定した注入開始時点の配合(以下、注入開始配合)を検討する。単一配合の $\mu Lu-Ce_t$ 曲線において、急激な閉塞が発生しない単一配合の $\mu Lu-Ce_t$ 曲線の勾配 δ は、W/Cに関わらずほぼ一定であることから、注入初期配合が、適正配合よりも貧配合の場合は、注入開始配合を従来の注入初期配合に準じて問題はないと考えられる。しかし、配合切替を含むデータと単一配合データで、急激な閉塞が発生したデータを分析した結果によると、 $6 \leq (W/C)_{RC}$ の範囲では $(Lu)_{RC} \leq 2$ 程度となっているのに対して、これよりも富配合の範囲では、 $(\mu Lu)_{RC}$ が増大する傾向が見られた。従って、分析対象ダムにおける適正な注入開始配合としては、対象ダムの注入初期配合を基本として $Lu \leq 10$ の場合はW/C=10、 $10 < Lu$ の場合はW/C=6が適当である。

5.2 配合の高濃度化中止基準値

配合切替を含む $\mu Lu-Ce_t$ 曲線には、急激な閉塞点Dが存在することから、点Dが発生する以前に配合を濃くすることを取り止めることにより注入効率が向上すると考えられる。Vce- Ce_t 曲線によると、点Dよりも手前の時点で勾配変化点Cが表れるため、点Cを確認した以降は配合の高濃度化を行わないこととし、これを配合の高濃度化中止基準値とした。

$(\mu Lu)_{RC}$ と $(W/C)_{RC}$ には相関性があると考えられるため、配合の高濃度化中止基準値をこの時点のW/Cとしても、改良目標値に対してW/Cが富配合となる場合は、 $(\mu Lu)_{RC}$ が改良目標値より大きくなり、注入効率が低下する可能性がある。また、配合の高濃度化中止基準値のW/Cを過度に貧配合とすると、結果として注入時間が増大することも考えられるが、本研究では、分析対象データ数が少ないこともあり、 $\mu Lu-Ce_t$ 曲線において急激な閉塞が発生する時点を遅らせることが、結果として注入効率の向上につながると考えて、分析対象ダ

ムにおいてグラウト配合逐次制御装置の使用を想定した場合の配合の高濃度化基準設定の一例を表-4 および図-15として示す。

表-4 配合の高濃度化基準の提案

注入開始配合	$Lu \leq 10$ W/C=10	$10 < Lu$ W/C=6
配合の高濃度化基準 ^{※)}	$\mu Lu-Ce_t$ 曲線の初期勾配変化点Bが発生した後に配合の高濃度化を開始し、配合の高濃度化中止基準値に達するまで継続する。	
配合の高濃度化中止基準値 ^{※)}	Vce- Ce_t 曲線の勾配変化点Cが表われた場合は配合の高濃度化を行わない。	

※) 図-15参照。

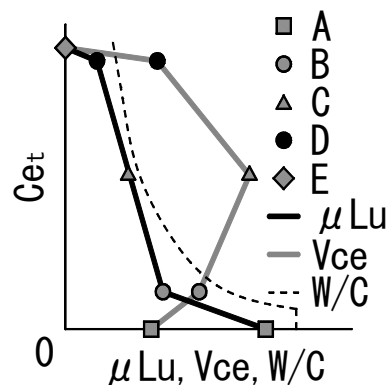


図-15 $\mu Lu, Vce, W/C-Ce_t$ 相関図

6. セメント注入量の予測

図-16に簡易な Ce 予測方法の模式図を示す。図中では、 $\mu Lu-Ce_t$ 曲線の初期勾配変化点Bを基点として、基点と時々刻々のデータを直線で延長し、各切片を時々刻々の Ce_t による $(Ce)_{est}$ としているため、注入データによる $\mu Lu-Ce_t$ 曲線の直線性が高ければ時々刻々の予測精度は高くなる傾向がある。 $(Ce)_{est}$ は、急激な閉塞の発生を考慮していないため、適性配合で注入した場合の Ce の予測値と位置づけることができる。 $(Ce)_{est}$ が増大した場合は、注入中に限界圧力が発生したと考えられ、減少した場合は、注入中の基礎地盤の透水性に対してW/Cが富配合となり急激な閉塞が発生したと考えられる。

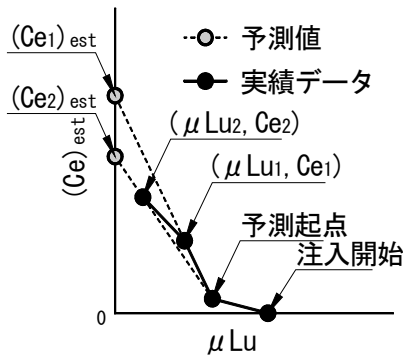


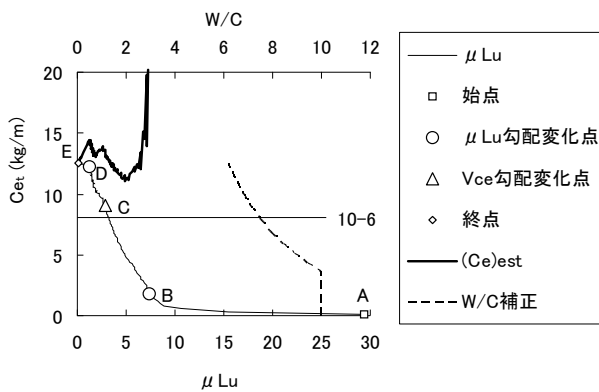
図-16 $(Ce)_{est}$ の模式図

7. 実績注入データを用いた Ce 予測と配合の高濃度化基準の検証

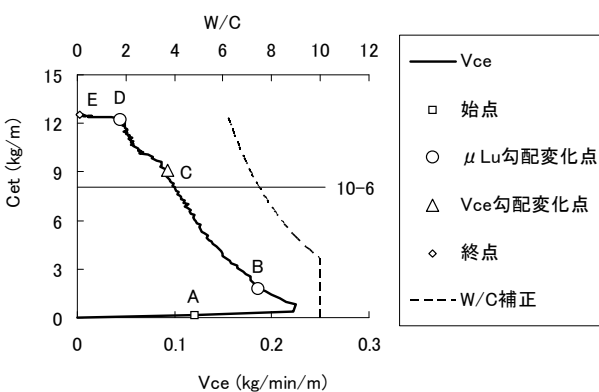
実績注入データを用いて Ce 予測と配合の高濃度化基準について検証した結果を、表-2の単位注入セメント量による区分に基づき、小注入($Ce \leq 25(\text{kg/m})$)、中注入($25(\text{kg/m}) < Ce \leq 50(\text{kg/m})$)、多注入($50(\text{kg/m}) < Ce$)として以下に示す。

7.1 少注入データ (C12-A4-2820)

図-17に比較的少注入となった注入の一例(C12-A4-2820)を示す。検証に用いたデータは、本研究



(a) $\mu Lu-Ce_t$ 相関図



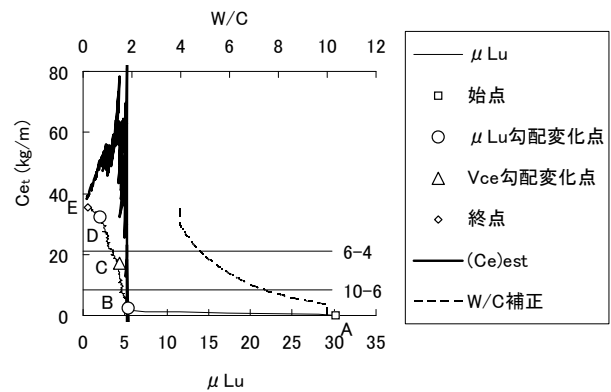
(b) $Vce-Ce_t$ 相関図

図-17 少注入データ (C12-A4-2820) 分析結果

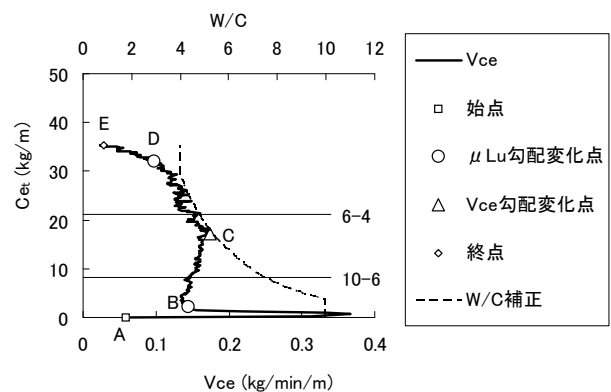
で設定した基準で注入したデータではなく、従来の基準に従い注入したものである。このデータは、 $W/C=10$ から注入を開始し、 $W/C=6.21$ (配合切替基準における $W/C=6$)で終了している。 $Vce-Ce_t$ 曲線の注入中盤部分の勾配変化点Cが明瞭でなく、その後の配合の高濃度化の継続により、 $(\mu Lu)_{RC}=1.22$ 、 $(W/C)_{RC}=6.28$ と、低透水の時点で $\mu Lu-Ce_t$ 曲線の点Dが表れ、注入が完了した。注入中盤部分の $(Ce)_{est}$ は概ね $13(\text{kg/m})$ 付近を推移しており、実績の $Ce=12.5(\text{kg/m})$ との差は非常に小さかった。この要因は、 $\mu Lu-Ce_t$ 曲線の初期勾配変化点B以降の勾配が比較的均一であり、グラウト配合が $6 \leq W/C$ の範囲内であったために、急激な閉塞が発生した時点の μLu が小さくなったと考えられる。

7.2 中注入データ (C10-A4-1620)

図-18に注入量が中程度となった注入の一例(C10-A4-1620)を示す。これは、 $W/C=10$ から注入を開始し、 $W/C=4.00$ (配合切替基準における $W/C=4$)で終了している。 $Vce-Ce_t$ 曲線の注入中盤部分で勾配変化点C($\mu Lu=4.36$ 、 $W/C=5.39$)が表れたが、配合の高濃度化が継続された結果、点D($(\mu Lu)_{RC}=2.03$ 、 $(W/C)_{RC}=4.00$)の時点で急激に閉塞した。 $(Ce)_{est}$ は概ね $50(\text{kg/m})$ 付近を推移



(a) $\mu Lu-Ce_t$ 相関図



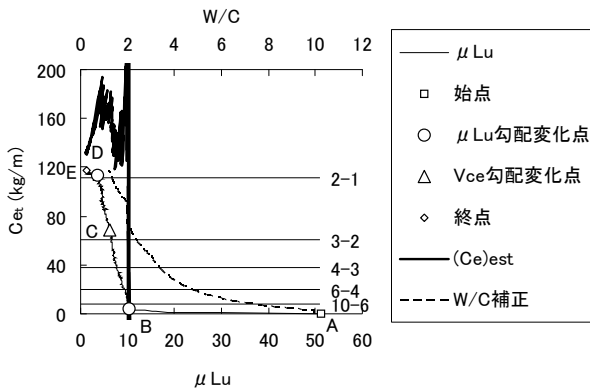
(b) $Vce-Ce_t$ 相関図

図-18 中注入データ (C10-A4-1620) 分析結果

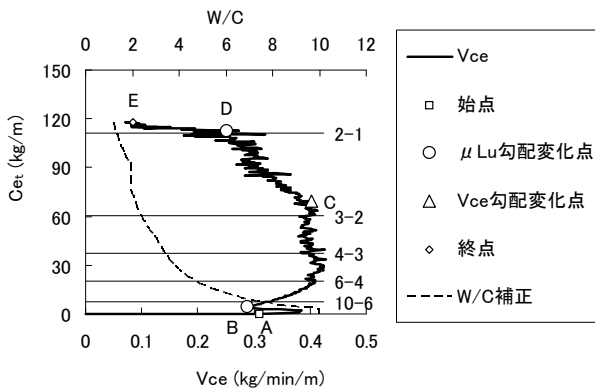
していたが、点Cが発生した後も配合の高濃度化を続けたため、点Dにおいて基礎地盤の透水性に対して富配合となり、 $(Ce)_{est}$ より少ない $Ce=35.3(\text{kg/m})$ で完了した。

7.3 多注入データ (C10-A8-4420)

図-19に比較的多注入となった注入の一例(C10-A8-4420)を示す。これは、 $W/C=10$ から注入を開始し、 $W/C=1.24$ (配合切替基準における $W/C=1$)で終了している。 $V_{ce}-C_{e_t}$ 曲線の注入中盤部分で勾配変化点C($\mu Lu=6.28$, $W/C=2.19$)が表れたが、配合の高濃度化が継続された結果、点D($(\mu Lu)_{RC}=3.75$, $(W/C)_{RC}=1.33$)の時点で急激に閉塞した。 $(Ce)_{est}$ は概ね $150(\text{kg/m})$ 付近を推移していたが、点Cが発生した後も配合の高濃度化を続けたため、点Dにおいて基礎地盤の透水性に対して富配合となり、 $(Ce)_{est}$ より少ない $Ce=115(\text{kg/m})$ で完了した。



(a) $\mu Lu-Ce_t$ 相関図



(b) $V_{ce}-C_{e_t}$ 相関図

図-19 多注入データ (C10-A8-4420) 分析結果

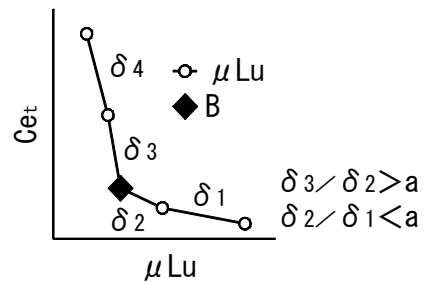
8. 効率的なグラウチング制御方法の提案

本研究で得られたグラウトの効率的注入を規定する評価指標は、限られた数の実績注入データに基づいて得られたものであるが、ここではこれらの指標の判定

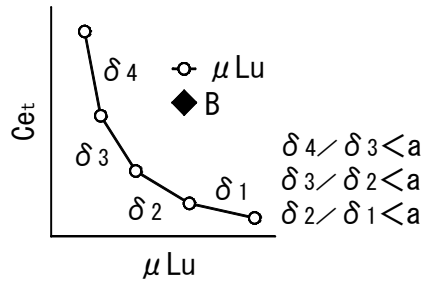
方法および得られた評価指標を用いた効率的なグラウチング制御方法を提案する。

8.1 $\mu Lu-Ce_t$ 曲線の初期勾配変化点 B の判定方法

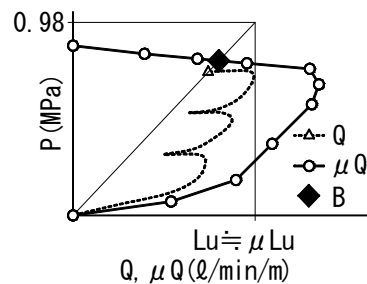
$\mu Lu-Ce_t$ 曲線の初期勾配変化点 B について判定方法の一例を図-20 および表-5 に示す。図-20(a)は、 $\mu Lu-Ce_t$ 曲線の勾配 δ の変化率によって判定する方法である。図では δ_2 と δ_3 の勾配が大きく変化していることにより、この時点をも点 B としており、概ねこの方法で判定が可能と考えられる。しかし、図-20(b)のように $\mu Lu-Ce_t$ 曲線の注入初期部分が緩やかな曲線となる場合や、採取された時々刻々のデータ間隔が短い場合は、データの乱れにより勾配 δ の変化率の精度が低下して勾配変化の判定が難しくなる場合も想定される。この場合は、勾配 δ を算出する際に、時々刻々のデータ間隔をある程度大きくとる方法が考えられるが、この他に、以下に示す方法も有効と考えられる。



(a) $\mu Lu-Ce_t$ 曲線勾配の δ 変化率による判定



(b) 勾配 δ 変化率が微妙な例



(c) P-Q 曲線, P- μQ 曲線の比較による判定

図-20 $\mu Lu-Ce_t$ 曲線における初期勾配変化点 B の判定例

表-5 $\mu Lu-Ce_t$ 曲線における勾配変化点 B の判定基準

基準1 ※1)	$\mu Lu-Ce_t$ 曲線において、以下の基準を満たす場合、点Bと判定する。 $\delta_t = (Ce_{t+1} - Ce_t) / (\mu Lu_{t+1} - \mu Lu_t)$ $\delta_t / \delta_{t-1} > a$ a は初期勾配変化点Bの判定時点における勾配 δ の変化率。
基準2 ※2)	基準1で判定が困難な場合、P-Q曲線とP- μQ 曲線を比較し、以下の基準を満たす時点をも、点Bと判定する。 $Lu = \mu Lu$ Lu はルジオンテストあるいは水押し試験時の最終値、 μLu はグラウト注入時の値。

※1) 図-20(a)参照。 ※2) 図-20(b), 図-20(c)参照。

図-20(c)は、水押し試験のP-Q曲線と、グラウト注入データの粘性変換流量 μQ を用いたP- μQ 曲線の比較による判定方法を示している。注入初期時点のグラウト配合は、比較的貧配合であり、グラウト注入による割れ目の閉塞状況も、あまり進行していないと考えられる。ルジオンテストあるいは水押し試験の最大圧力時点の最終流量 Q は、定常浸透状態をほぼ達成しつつある時点と考えられ、グラウトの規定注入圧力に最も近い流量安定状態の圧力データであることから、グラウトの安定流量状態のデータを推定する上では、最も適した値と考えられる。従って、ルジオンテストあるいは水押し試験の最大圧力の最終時点のP-Q曲線データと原点を結ぶ直線を描き、これとP- μQ 曲線の交点、つまり $Lu = \mu Lu$ となる点を初期勾配変化点Bとする方法が考えられる。

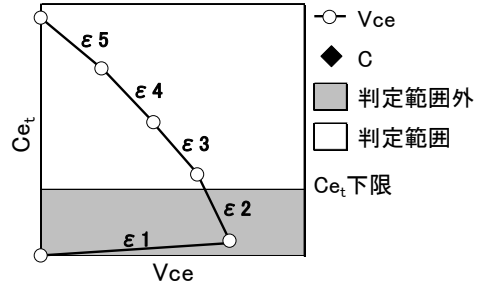
8.2 Vce-Ce_t 曲線の勾配変化点 C の判定方法

Vce-Ce_t 曲線は図-21に示すとおり、大きく3種類のパターンに分類できる。Vce-Ce_t 曲線の勾配変化点Cの判定基準の一例を表-6に示す。

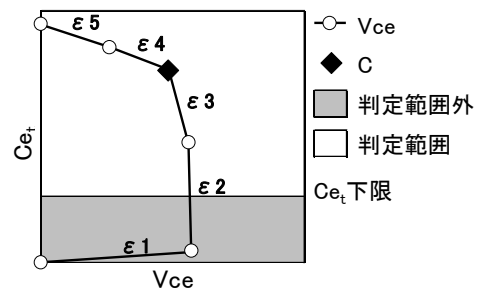
図-21(a)は、Vce-Ce_t 曲線に勾配 ϵ の変化点Cが発生しないパターン(一定勾配型)である。このパターンは、配合切替を伴わない注入に多く見られる。注入開始直後に ϵ_1 と ϵ_2 の間に勾配変化点が発生しているが、この時点のデータは、注入開始直後の圧力と流量が安定状態に達していない時点あるいはその付近と考えられ、点Cの判定範囲外とすべきと考えられる。

図-21(b)は、Vce-Ce_t 曲線が、注入初期段階に最大値を示し、Vce-Ce_t 曲線は緩やかな減少勾配を示すが、 ϵ_3 と ϵ_4 の間で勾配が急激に変化するパターン(減少→減少型)である。この場合は、この勾配変化点を点Cと判定すべきと考えられる。

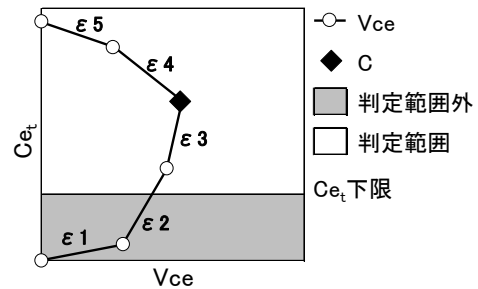
図-21(c)は、Vce-Ce_t 曲線の傾きが、注入中盤部分で、正から負へ変化するパターン(増加→減少型)である。この場合は、傾きが正から負へ切り替わる時点をもポイントCと判定するべきと考えられる。



(a) 一定勾配型



(b) 減少→減少型



(c) 増加→減少型

図-21 Vce-Ce_t 曲線における勾配変化点 C の判定例

表-6 Vce-Ce_t 曲線における勾配変化点 C の判定基準

基準 ※1)	$Ce_t < b$ の場合は、Vce-Ce _t 曲線における点Cの判定を行わない。 $\epsilon_t = (Ce_{t+1} - Ce_t) / (Vce_{t+1} - Vce_t)$ $\epsilon_t / \epsilon_{t-1} < c$ b は点C判定におけるCe _t の下限値。 c は適正な配合と考えられる時点Cにおける勾配 ϵ の変化率。
--------	--

※1) 図-21参照。

8.3 $\mu Lu-Ce_t$ 曲線の急激な閉塞点 D と $(W/C)_{RC}-(\mu Lu)_{RC}$ 曲線の相関性

$\mu Lu-Ce_t$ 曲線の急激な閉塞点 D は、注入中の基礎地盤の透水性に対して配合が富配合となった時点で発生すると考えられる点である。注入効率を評価する上では、急激な閉塞点 D の判定基準を設定する必要がある、図-22 および表-7 にその一例を示す。

$V_{ce}-Ce_t$ 曲線の勾配変化点 C が、過度に貧配合となる場合は、結果として注入時間が増大することも考えられるため、対策を講じる必要性が考えられる。 $(\mu Lu)_{RC}$ と $(W/C)_{RC}$ には図-23(a) に示す相関性があると考えられるため、比較的強い相関が認められた場合は、注入孔間隔や注入圧力を考慮して、図-23(b) に示す、次数別あるいは孔ごとに、急激な閉塞点 D が発生する $(\mu Lu)_{RC}$ を設定し、これに対応する $(W/C)_{RC}$ を配合の高濃度化中止基準値とすることにより、低次数孔の W/C が貧配合となることによる注入時間の増大を防ぐことが可能になると考えられる。

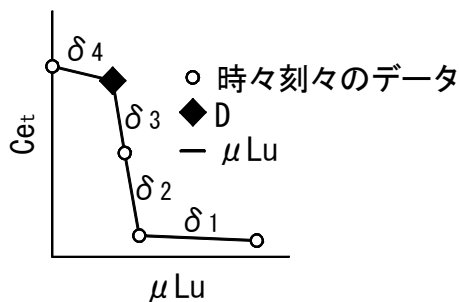
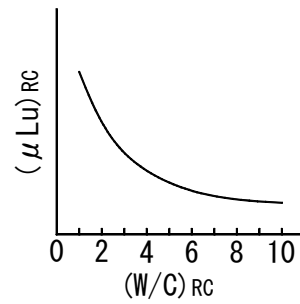


図-22 $\mu Lu-Ce_t$ 曲線における初期勾配変化点 D の判定例

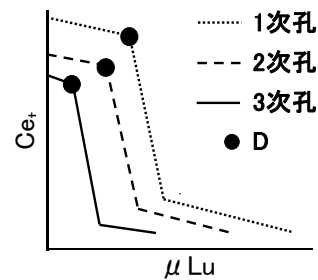
表-7 $\mu Lu-Ce_t$ 曲線における急激な閉塞点 D の判定基準

基準 ※1)	$\mu Lu-Ce_t$ 曲線において、以下の基準を満たす場合、点 D と判定する。 $\delta_t = (Ce_{t+1} - Ce_t) / (\mu Lu_{t+1} - \mu Lu_t)$ $\delta_t / \delta_{t-1} < d$ d は急激な閉塞点 D の判定時点における勾配 δ の変化率。
--------	--

※1) 図-22 参照。



(a) $(\mu Lu)_{RC}-(W/C)_{RC}$ 曲線



(b) 次数別 $(\mu Lu)_{RC}$ 低減図

図-23 急激な閉塞点 D の設定

8.4 配合の高濃度化方法

グラウト配合逐次制御装置を用いて配合の高濃度化を行った場合、図-24 に示すとおり、二液が混合される位置と試験区間との間には距離があるため、注入孔内部のグラウト配合と、二液混合箇所でのグラウト配合に差が生じる。 $V_{ce}-Ce_t$ 曲線の勾配変化点 C と判定された時点の μLu には、注入孔内部の配合が反映されており、この部分の配合は、注入の配合データに反映される二液混合箇所の配合よりも貧配合となっている。このため、配合の高濃度化速度が速い場合には、配合差が大きくなり、データの判定精度が低くなる恐れが考えられる。配合の高濃度化速度は、上述の点を考慮して、注入時間に基づくのではなく、 Ce_t に基づいて設定することが有効と考えられ、二液混合箇所と注入区間までの距離はできるだけ短いことが望ましいと考えられる。

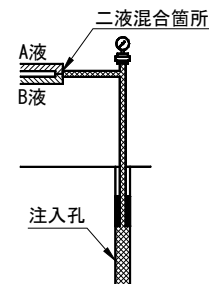


図-24 グラウト配合逐次制御装置を用いた注入模式図

9. まとめ

本研究では、グラウトの効率的注入を規定する評価指標解明のため、ダム基礎グラウチングの実績注入データを用いて、グラウトの閉塞過程を分析した。さらに、効率的なグラウチング制御方法として、グラウト配合逐次制御装置を用いた注入を想定して、配合の高濃度化基準と簡易な C_e の予測方法を検討し、これらについて検証を行った。

ここで得られた成果は、対象ダムサイトの注入実績データに関するものであり、一般化できたものではないが、 $\mu Lu-C_e$ 曲線は、注入初期の不安定な流量状態が収まった後の安定流量となった初期勾配変化点 B から急激な閉塞点 D までの間は、注入中のグラウト配合が変化しても直線状を示すことがわかった。急激な閉塞点 D は、注入中の基礎地盤の透水性に対して富配合となる場合に発生すると考えられ、これよりも貧配合による注入では、急激な閉塞は発生しないこともわかった。仮にグラウト配合逐次制御装置を用いても、点 D が発生した後では注入効率を回復させることは困難と考えられるため、その手前の段階で配合を調節することにより、急激な閉塞の発生を遅らせる可能性が考えられる。 $V_{ce}-C_e$ 曲線には、急激な閉塞点 D よりも手前の時点で V_{ce} の増加が減少に転じたり、緩やかな減少が急激な減少へと変化したりする勾配変化点 C が存在するため、点 C より若干手前の時点で適正配合が存在する可能性がある。従って、点 C の配合を指標として、配合の高濃度化の判断を行うことにより注入効率が向上する可能性が考えられる。

グラウト配合逐次制御装置の配合の高濃度化基準のうち、分析対象ダムでは、注入開始配合を $6 \leq W/C$ の範囲から Lu に応じて設定することが効果的と考えられ、配合の高濃度化中止基準値については、 $V_{ce}-C_e$ 曲線の勾配変化点 C よりも若干手前の W/C とすることが効果的と考えられる。しかし、配合の高濃度化中止基準値をこの時点の W/C としても、 $(\mu Lu)_{RC}$ と $(W/C)_{RC}$ には相関性があると考えられるため、改良目標値に対して配合の高濃度化中止基準値の W/C が富配合となる場合は、 $(\mu Lu)_{RC}$ が改良目標値より大きくなり、注入効率が低下する可能性がある。また、配合の高濃度化中止基準値の W/C を過度に貧配合とすると、結果として注入時間が増大して、工程が遅延したり不経済となったりすることも考えられる。合理的な基準値を設定するためには、各ダムサイトにおいてグラウチングの試験施工を実施する必要があり、規定注入孔間隔と規定注入圧力を考慮した改良目標値を注入孔や次数ごと

に設定し、これに見合う配合の高濃度化中止基準値を $(\mu Lu)_{RC}$ と $(W/C)_{RC}$ の相関から見出すという方法が考えられる。

参考文献

- 1) (財)国土技術研究センター編集：グラウチング技術指針・同解説，pp.37-47，大成出版社，2003。
- 2) International Society for Rock Mechanics：Commission on Rock Grouting (Final Report)，1995。
- 3) Houlsby, A. C.: Construction and Design of Cement Grouting, John Wiley & Sons, pp.91-94, pp.163-165, 1990。
- 4) 前田建設工業(株)，日特建設(株)：Multi CO-MIX グ라우チング用セメントミルク任意配合変換装置，(財)土木研究センター建設技術審査証明報告書，2005。
- 5) 関電工業(株)，KK自動グラウチングシステム，ダム技術，No.85，pp.58-61，2002。
- 6) 建設省河川局開発課監修：グラウチング技術指針・同解説，財団法人 国土開発技術センター，1983。
- 7) 山口嘉一，佐藤弘行，西岡正浩：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，土木学会，土木学会第62回年次学術講演会講演概要集CD，2007。
- 8) 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.9，No.3，pp.175-186，1999。
- 9) 最新地盤注入工法総覧編集委員会：最新地盤注入工法技術総覧，pp.501-503，1997。
- 10) (財)国土技術研究センター編集：ルジオンテスト技術指針・同解説，大成出版社，pp.20-24，2006。
- 11) 山口嘉一，新家拓史：無段階水押し試験による不飽和地盤の透水性評価，ダム工学，Vol.16，No.2，pp.94-108，2006。
- 12) 山口嘉一，安仁屋勉，池澤市郎，赤松利之：不飽和軟岩地盤における長時間透水試験，第42回地盤工学研究発表会平成19年度発表講演集CD，2007。
- 13) 山口嘉一，佐藤弘行，西岡正浩：水押し試験における限界圧力判定精度，地盤工学会，第42回地盤工学研究発表会平成19年度発表講演集CD，2007。
- 14) 山口嘉一，佐藤弘行，西岡正浩：水押し試験における限界圧力判定，土木学会 岩盤力学委員会，第37回岩盤力学に関するシンポジウム講演集CD，2008。
- 15) 山口嘉一，佐藤弘行，西岡正浩：グラウチング注入データを用いた閉塞過程の分析，地盤工学会，第43回地盤工学研究発表会平成20年度発表講演集CD，2008。
- 16) 山口嘉一，佐藤弘行，西岡正浩：ダム基礎グラウチングのグラウト閉塞過程を考慮した配合制御の検討，ダム工学，Vol.18，No.1，pp.21-35，2008。

- 17) 山口嘉一，佐藤弘行，西岡正浩：グラウチング注入データを用いた閉塞過程の分析（その2），土木学会，土木学会第63回年次学術講演会講演概要集CD，2008.
- 18) 山口嘉一，佐藤弘行，西岡正浩，塚越雅之：ダム基礎グラウチングの注入データを用いた閉塞過程の分析，第12回岩の力学国内シンポジウム講演集CD，2008.

STUDY ON EFFECTIVE INJECTION METHOD FOR DAM FOUNDATION GROUTING

Abstract : In dam foundation grouting, grout mix proportion is designed based on Lugeon value, which is an index of permeability of foundation. The "Thick or thin?" in the grout mix proportion is still important and difficult problem. Recently, researches on the optimum mix proportion of the grout are positively advanced, and a system which can automatically change the grout mix proportion, a "Variable Mix Injection System", has been developed. The system could improve the efficiency of the dam foundation grouting. In this study, the process of the injection was analyzed based on actual grouting data obtained at a dam site. In addition the method of predicting an amount of cement based grout take and the method of controlling the optimum grout mix proportion was investigated.

Key words: dam foundation grouting, Lugeon value, cement based grout, thickening sequence of grout mix proportion, unit cement take