

X線CTを用いたModified GIN工法導入地点での グラウト浸透状況の可視化

吉津 洋一¹・井関 恭輔²・井関 宏崇³・中島 伸一郎⁴・岸田 潔⁵

¹フェロー 株式会社ニュージェック代表取締役社長 (〒531-0074 大阪市北区本庄東 2-3-20)

E-mail: yoshizuyc@newjec.co.jp

²正会員 西日本旅客鉄道株式会社 (〒530-8341 大阪市北区芝田二丁目 4 番 24 号)

E-mail: kyousuke-iseki@westjr.co.jp

³正会員 関西電力株式会社 水力事業本部 (〒530-8270 大阪市北区中之島 3 丁目 6 番 16 号)

E-mail: iseki.hiroataka@c4.kepco.co.jp

⁴正会員 山口大学准教授 大学院創成科学研究科 (〒755-8611 宇部市常盤台 2-16-1)

E-mail: nakasima@yamaguchi-u.ac.jp

⁵正会員 京都大学教授 大学院工学研究科 (〒615-8540 京都市西京区京都大学桂 C1-2-335)

E-mail: kishida.kiyoshi.3r@kyoto-u.ac.jp (Corresponding Author)

GIN 工法をベースに注入材料の配合, 注入圧力の設定, 注入量制限を再考し, 安全性・確実性に配慮した Modified GIN 工法が提案され, 実際に施工された. 本研究では, Modified GIN 工法によるグラウトの充填状況を確認するため, 実施地点よりグラウト充填ボーリングコアを採取し, 医療用 X 線 CT と μ フォーカス X 線 CT により CT 画像の撮影および画像解析を行った. CT 画像の分析により, 割れ目内にグラウト材が充填されていること, 割れ目の幅が大きくなれば, グラウト材が層をなして充填していることが確認された. 割れ目幅の広いところは, 先行して注入された濃度の薄いグラウト材に濃度の濃いグラウト材が繰り返し注入された結果であると考えられ, このことは, 実際の施工状況と一致することになる.

Key Words : grouting, modified GIN method, μ -focus X-ray CT, fractures, image analysis

1. はじめに

ダムの建設時において, グラウチング工法により基礎地盤の地盤改良が行われることが一般的であり, 大きく分けると二つの目的がある. 一つは, 必要な遮水性を向上・確保し, 漏水によるパイピング現象や揚圧力の上昇によるせん断抵抗力の低下などの被害を防ぐため, もう一つは, 弱部補強による基礎地盤の均一性向上を図ることである^{1)~4)}. グラウチング工法に関する技術的な基準として「グラウチング技術指針・同解説」¹⁾が運用されており, 現在に至るまでに蓄積された施工情報・知見をもとに, より合理的なグラウチング工法を目的として改訂が行われてきた. しかし, 良好な基礎地盤のダムサイトの減少に伴いグラウチング施工のダム建設全体の工程に与える影響は増大しており, そのため工期・コストの面においても工事全体に占める割合は多くなる傾向にある.

近年, 欧米において GIN (Grouting Intensity Number) 工法²⁾と呼ばれるグラウチング工法が開発・推進されており, 日本国内では使用実績はないがいくつかの施工事例が海外で行われている³⁾⁶⁾⁸⁾. 透水試験, 水押し試験等を実施し, 対象地質の状況に応じて詳細な注入条件や配合を決める従来の工法と異なり, GIN 工法は地盤強度に応じて選定したGINカーブにより注入圧力を求めるため, 施工が単純で特殊な技能を要さないことから工期・コストを大幅に低減できる利点がある. 一方, GIN 工法は比較的新しい工法であるため実績が少なく, グラウチング効果の信頼性において更なる検討の余地があると考えられる. こうした中, ラオスのナムニアップ川水力発電プロジェクトにおけるグラウチング施工において, Modified GIN 工法⁹⁾が適用された. Modified GIN 工法は, 日本で通常実施されるダムグラウチング工法とGIN工法の長所・短所を比較したうえで, GIN 工法をベースに注入材料の配合, 注入圧力の設定, 注入量制限を再考し,

安全性も十分に考慮された工法である。

一般に、グラウトによる改良効果は、施工中の圧力や注入量、あるいはルジオン試験等によって確認される⁹⁾が、改良すべき岩盤中の割れ目の充填状況を直接確認するものではない。グラウト施工後、グラウト状況を確認するために採取されたボーリングコアを観察することにより、グラウト充填状況は概略判断できるものの、微細な割れ目のどこまでグラウト材が到達しているのか、割れ目の壁面とグラウトとの境界には隙間が残されているのかどうか、複数回・複数濃度で注入した場合にはそれらがどのような順序で割れ目を充填しているのか等の、内部構造・充填率・材質分布までを詳細に把握することは困難である。

本研究では、GIN カーブに則って高濃度・高圧力でグラウトを実施する Modified GIN 工法に対して、対応地質の状況に応じて詳細に注入濃度や圧力を決める日本のダムグラウチング工法で期待されるようなグラウト改良効果が得られたかどうかを確認するため、Modified GIN 工法で施工された地点で採取されたボーリングコアを用いて X 線 CT によるコアの内部を非破壊的に可視化することとした。割れ目内部のグラウト未充填箇所を幾何学的な形状や、グラウト材質分布などの物質的な情報をその場観察するには、X 線 CT のような可視化技術が不可欠である。第一の目的は、X 線 CT により、コアを構成する岩石部 - 割れ目 (空隙) - グラウトのそれぞれを明瞭に識別可能かどうかを調査することである。医療用ヘリカル CT スキャナ (以下医療用 CT) を用いてコア全体をスライス厚 0.250mm 間隔で高速撮影し、グラウト充填領域をおおまかに把握したのちに、代表的な箇所についてはマイクロフォーカス X 線 CT スキャナ (以下 μ X 線 CT) を用いてスライス厚 0.058mm 間隔の高解像度で撮影した。第二の目的は、種々の幅で分布する割れ目にどのようにグラウトが充填しているのかを把握することである。X 線 CT 画像の解析を通して、グラウト材の流動挙動を把握するとともに、Modified GIN 工法によって施工された地点のグラウト充填状況の評価を行った。

2. 対象地点の地質概要と対象ボーリング孔

本研究で対象としたダム建設サイトの地質縦断面図を図-1に示す。対象地点は、砂岩と泥岩の互層構造が幅広く分布している。図-1に示される赤い線は、砂岩と泥岩の境界に存在する弱層(weak layer)である。また、右岸側の地層は、過去に強い応力を受けた影響によると考えられる大きな褶曲構造を示しており、弱層、砂岩層および泥岩層に多くの割れ目が存在する複雑な地層構造を形成している。河床部から深度 100 m (E.L. 50 ~ 150 m) におい

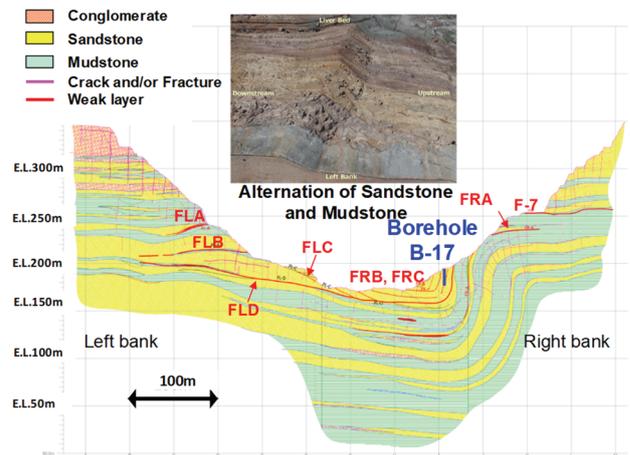


図-1 対象地点の地質縦断面図とボーリング孔の位置

ては泥岩層が優位であり、高い強度と遮水性が期待できる。

本研究で CT 撮影を実施したボーリング孔は、図-1に示す B-17 孔である。グラウチングは、ステージ方式(5m 毎に必要なに応じて濃度を切り替える)で行われた。B-17 孔は、カーテングラウトの 17 ブロック (以下、17BL) に位置するボーリング孔であり、17BL ではグラウチングは中間内挿法で 6 次孔まで施工されている。17BL は、先にも述べた通り褶曲作用を受けた地点であり、多くの割れ目を有する地層に B-17 孔は設けられた。

3. グラウト注入状況

B-17 孔付近のグラウト注入状況を図-2に示す。グラウチング施工は、深度 5 m ごとのステージに区切って基本的に上位のステージからグラウチングが行われた。図-2に示されている円は、左半円でルジオン値、右半円は注入されたセメント量を表している。先述の通り 17BL は複雑な地質を有し透水性が極めて高い。B-17 孔付近に存在する 2 次孔や 4 次孔のルジオン値は、20 を超える高透水性地盤であり、実施工では大量のグラウト材が注入されている。結果として、先行して実施されたグラウチングの注入材量が B-17 孔付近に流入していると想定される。

グラウチング施工に使用されたグラウト材の配合は、水・セメント比が 1.5 の注入で、圧力が規定値に満たなかった場合に水・セメント比を 0.8, 0.6 に切り替えて 3 種類の濃度で注入が行われた。

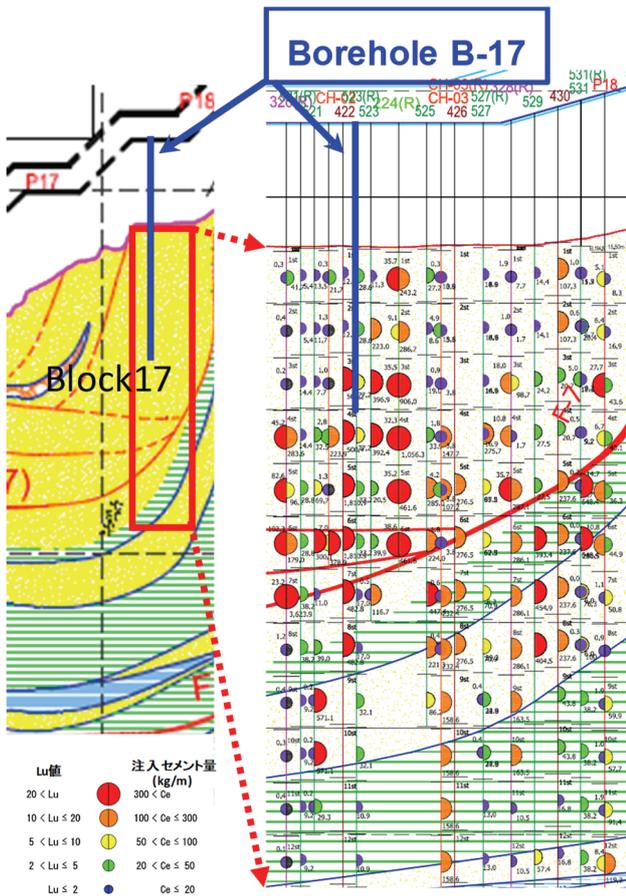


図-2 17BL孔区のグラウト注入状況

4. 医療用ヘリカルCTスキャナによる撮影と分析

(1) X線CT

X線CTは、検査対象物に様々な方向からX線を照射して透過量を記録し、対象物内部のX線吸収率の分布を求める技術である。X線CTによって得られる画像(CT画像)はX線吸収率をマッピングしたモノクロ画像で、吸収率は空気を-1000 HU、水を0 HUとする単位で表され、これをCT値と呼ぶ。本稿ではHUは省略する。X線CTでは、対象物をスライスした1断面ごとに取得する。各スライス断面は、等間隔の格子状に分割され、各格子をピクセル(平面画素)、各格子のCT値を画素値と呼ぶ。また、スライス間隔をスライス厚とし、ピクセル×スライス厚が立体画素(ボクセル)である。

X線CTのスキャナは、医療用、産業用、マイクロフォーカス型に大別される。人体を対象とする医療用スキャナは、高速撮影が可能だが解像度が比較的低い。一方、人体以外の物体を対象とする産業用スキャナやマイクロフォーカス型は、X線照射時間やX線強度についての制約が少ないため、より高解像度のCT画像を取得することが可能である。特にマイクロフォーカス型は、X線の焦点寸法を数 μm まで絞ることで細部を識別する能力が

表-1 医療用ヘリカルCTスキャナ撮影条件

Slice size [mm]	0.25
Voxel size [mm]	0.0568×0.0568×0.25
X-ray tube voltage [kV]	140
X-ray tube current [mA]	200
Exposure time [s]	1.5
Eposure [mA's]	300

高い。X線CTにより岩石の内部構造を可視化する研究は行われているが^{11)~13),18)}、グラウト充填状況の評価を行った研究は見られない。

本研究で、まず医療用CTを用いてコア全体をスライス厚0.250mm間隔で高速撮影し、画像分析によりグラウト充填領域をおおまかに把握したのちに、代表的な箇所についてはマイクロフォーカスX線CTスキャナ(以下 μX 線CT)を用いてスライス厚0.058mm間隔の高解像度で撮影した。

(2) 撮影条件

μX 線CT撮影に先行してグラウチングの充填状況の把握のため、医療用CTによりコア全体のCT撮影が実施された。表-1に医療用CTの撮影条件を示す。CT撮影では、人体撮影での頭から足先の方にコアの軸方向を合わせて撮影を行った。座標軸は、コア軸方向をz軸、軸直交断面をxy軸とする。画素寸法は、xy平面が $56.8\mu\text{m} \times 56.8\text{mm}$ で、z方向(スライス厚)は0.250mmである。

ボーリングコアの状態は、良好なものから損傷の激しいものまでさまざまであり、元々の割れ目かどうか判定の難しい箇所も存在する。また、岩部とグラウト部が剥離しているものもあり、画像解析では注意が必要である。本稿では、医療用CTでは12ヶ所のコアを分析し、そこから7ヶ所のコアを選び μX 線CTで撮影・分析を行った。

(3) 撮影結果

図-3に医療用CTで撮影された結果を示す。結果は、左からコア写真、横断面画像、縦断面画像(横断面と直交する断面画像)、水平断面画像となっている。これらの断面画像からわかるように、岩部や鉱物部は認識しやすいが、グラウト部は不鮮明な部分が多い。

(4) 画像解析

図-3に示すようにCT画像から、岩石実質部、割れ目およびグラウトはおおよそ識別が可能である。そこで、各コアのCT画像からの目視で岩、割れ目内の空隙、グラウトの代表領域を抽出してそのCT値を分析した。画像解析にはImageJを用い、

- (i) 分析対象とするコアのCT画像での水平断面および鉛直断面の連続画像をソフト上で開く。
- (ii) 連続断面画像を参照し、代表領域を抽出しそのCT

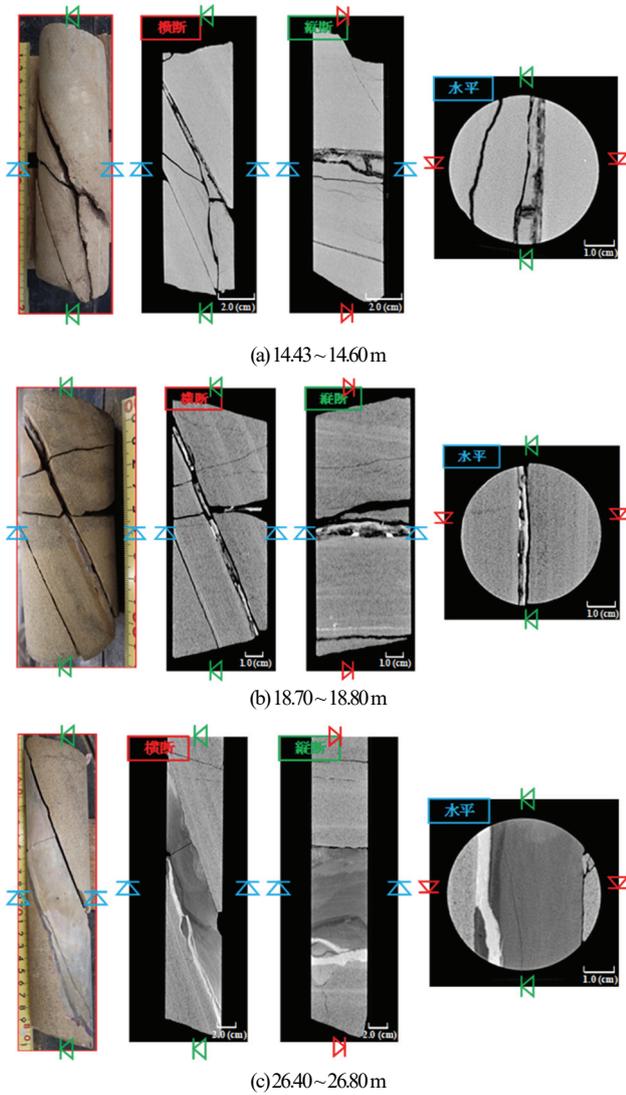


図3 医療用ヘリカルCTスキャナで撮影された画像

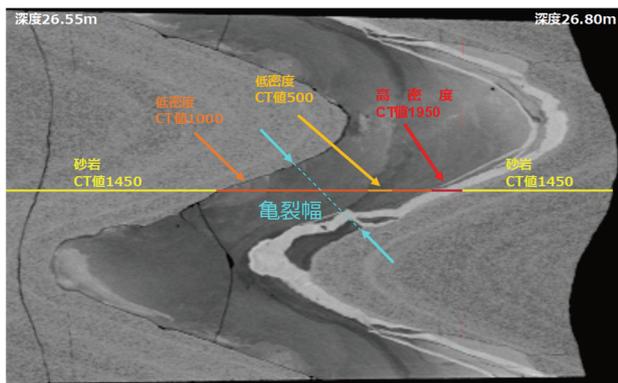


図4 図3(c)の下部のCT画像展開図

値分布を分析した。なお、同じグラウトでも図-3(c)のようにCT値に差がある場合は、複数のグラウト材が存在するとして25~30ヶ所サンプリングする。ここでは、画像上は256階調のグレーで表しているが、分析上は符号付き16bitのCT値をそのまま使用して分析を行った。

(iii) 解析を行った層ごとにCT値のヒストグラムを作成する。

図-4は、図-3(c)の下部の供試体表面付近のCT画像の展開図を示す。図では、左から右が深度方向となる。ここは、比較的割れ目が大きく、CT画像の展開図より、低密度グラウトと高密度グラウトが確認できる。割れ目幅が大きい場合は、低密度グラウト部を押し広げるような形で高密度のグラウトが注入されていると考えられる。このことは、実際に、最初に低密度のグラウト材を注入し、所定の圧力に届かなければ、高密度のグラウト材を注入しており、施工実態と一致する。

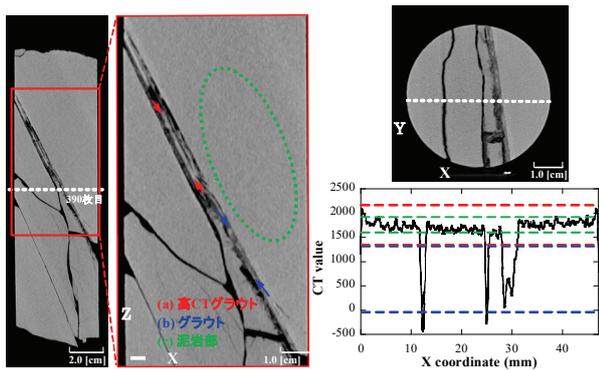
画像解析によって得られたCT値の分析結果を表-2に、図-3で示したCT画像の代表的な水平断面のCT値分布を図-5に示す。表-2は、図-5の水平断面画像の白色点線で示す測線上のCT値分布から、図-5のグラフに示すそれぞれの領域層のCT値の平均および標準偏差を示したものである。表-2には、図-5に示す地点以外の結果も記す。ここでの開口幅は、CT画像での割れ目部の数ヶ所でCT値ヒストグラムの変化から抽出・算定したものである。各領域のCT値の分布は正規分布であると仮定し、各領域の95%信頼区間を図-5の各グラフに点線で示している。グラウトは、CT値から3層に分けて分析を行った。なお、後述するがグラウト領域を抜き出してCT値の頻度分布を調べたところ図-12のように3つのピークが認められた。実際に実施したグラウト条件(3濃度)と整合していることから、それぞれ低・中・高CT値グラウトと設定した。

図-5(a)の拡大されたCT画像の上部に存在する幅3mmの割れ目にCT値1800程度の高CTグラウト(図中の赤矢印部)が確認される。また、CT値分布のグラフから幅1mm以下の割れ目でCT値650程度のグラウトが充填されていることが確認できる。さらに、幅1mm以上の割れ目(x座標が30付近)では、CT値は左から一度250まで低下し、その後600程度まで上昇し、その後再び250程度まで減少した後、上昇している。このことより、ここでは、2種類のCT値、すなわち2種類のグラウトが混在して充填していることが確認できる。図-5(b)では、層界面に存在する幅3mmの割れ目にCT値2000程度の高CTグラウト、1300程度のグラウトが充填している。高CTグラウトは、上部に充填している様子が確認できる。一方、断面画像から割れ目が充填されていないように目視できるが、CT値分布はCT値が連続して存在することを示している。割れ目周辺のCT画像の目視とCT値分布から、割れ目左側は充填状況は密ではなく、割れ目内の空隙とのミクセルが多い箇所であると考えられる。ミクセルとは、同一ボクセル内に2つ以上の密度の異なる物質が含まれるボクセルのことで、CT撮影装置の解像度とスライス厚にミクセルの影響は依存する。CT値の高

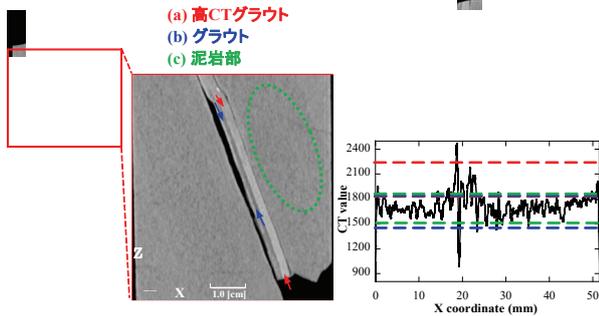
表-2 医療用ヘリカルCTスキャナを用いた画像解析

Depth (m)	Rock		Aperture [mm]	Grouting CT value ($\mu\sigma$)		
	Type	CT value ($\mu\sigma$)		low	middle	high
14.43~14.60*	Mudstone	1728(67)	1.8		643(349)	1862(244)
14.70~15.00	Mudstone	1715(105)	1.4		314(590)	
18.00~18.13	Mudstone	1681(86)	3.2		1649(102)	2024(94)
18.70~18.80*	Mudstone	1634(100)	3.2		1308(188)	2044(196)
18.80~18.90	Mudstone	1587(102)	1.1		1155(215)	
19.18~19.43	Sandstone	1551(105)	1.6		679(148)	1773(288)
19.55~19.65	Sandstone	1499(121)	1.1		1235(194)	
19.80~19.90*	Sandstone	1635(109)	1.4		491(235)	
22.00~22.20*	Mudstone	1873(76)	1.7		985(216)	2101(386)
22.40~22.50*	Mudstone	1852(80)	1.2		885(248)	
26.50~26.80*	Sandstone	1538(118)	31.1	611(57)	1033(125)	2101(101)
27.50~27.60*	Mudstone	848(177)	1~15		1919(252)	

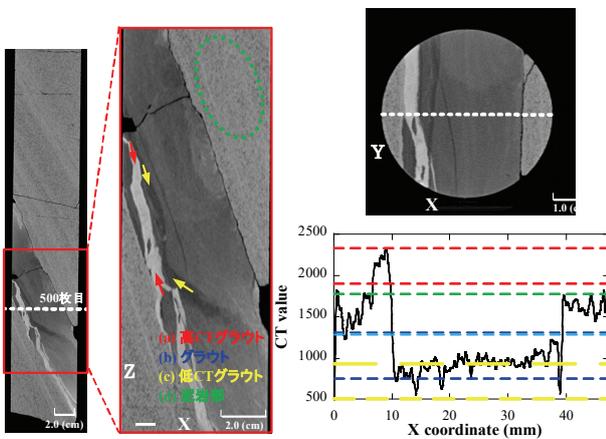
*: μX 線 CT で撮影実施



(a) 14.43 m 地点 (14.43~14.60 m)



(b) 18.70 m 地点 (18.70~18.80 m)



(c) 26.50 m 地点 (26.40~26.80 m)

図-5 抽出された CT 画像と代表的な水平断面画像の CT 値分布

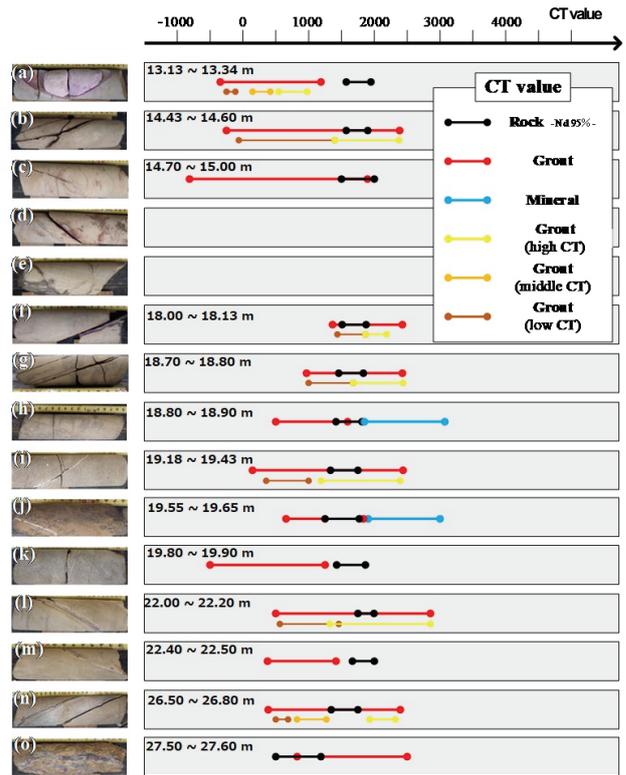


図-6 各 CT 撮影地点での CT 値の分布

い高 CT グラウト層は、割れ目に沿った形で上部から下部に存在する。図-5(c)では、幅 30 mm の割れ目が層理沿いに存在し、CT 値 2100 程度の高 CT グラウト、1000 程度のグラウト、600 程度の低 CT グラウトの三層が密に充填されている。高 CT グラウトは割れ目の下部に、低 CT グラウトは高 CT グラウト近傍を中心に充填している。泥岩部も含めて各層の境界が鮮明である。図-5 のような分析を実施し、図-6 に表-2 に示す各地点の CT 値分布を示す。割れ目幅が 30 mm を超える深度 26.50 m コアについて、図-5(c)の分析よりグラウトは CT 値から三層で構成されることが確認できる。また、これらのコアには、非常に密にグラウト充填されており、他のコアと比較して CT 値の分散も小さい。グラウトの CT 値は、26.50 m コアの低 CT 値グラウトが平均 611 である。グラウトの

充填状況が 2 層と視認できるコア(14.43, 18.00, 18.70, 19.18, 22.00 m)については、まず割れ目幅が 3.2 mm と大きい 18.00, 18.70m の 2 つのコアには、高 CT 値グラウトが岩石近傍に多く付着しており、中 CT 値グラウト部を挟むような充填形状となっている。一方、割れ目幅が 1.5~2.0 mm と小さい 14.43, 19.18, 22.00 m コアについては、2 種類のグラウトが混在しており、必ずしも高 CT 値グラウトが岩石近傍に付着している特徴は確認できない。また、一層のグラウトのみが充填しているコア(14.70, 18.80, 19.55, 19.80, 22.40m)について、14.70m コアと 19.80 m コアのグラウト部の CT 値がそれぞれ 314, 491 と低い。特徴としては、他の 3 つのコアはいずれもコア内において連続した層理に沿った割れ目であり、割れ目の角度も 50 度を超えている。一方、14.70 m コアは割れ目が不連続で割れ目幅も小さく、グラウトが十分に注入されなかった可能性が考えられる。また、19.80 m コアはグラウトが充填されている層理に沿った割れ目の角度が 20 度と低角度であったため、ボクセルサイズがボーリング孔軸方向には 0.25 mm であり、割れ目壁面に生じる空隙と平均化された可能性が考えられる。

5. μ フォーカス X 線 CT による撮影と分析

(1) 撮影条件

医療用 CT で分析された地点のうち 8ヶ所 (表-2 中に* を表示) のコアを用いて μ X 線 CT 装置により撮影を行った。撮影条件を表-3 に示す。スライス厚は医療用 CT の約 1/5 倍の 0.058 mm で、1 画素 (1 ボクセル) は、 $53.2 \times 53.2 \times 58.0 \mu\text{m}^3$ である。このため、ミクセルの影響が少なく、より精緻な CT 画像が取得できる。

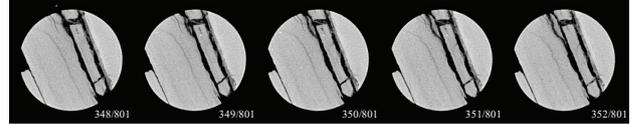
(2) 撮影結果

まず、医療用 CT と比較するため 14.43m 付近の連続した水平断面画像を図-7 に示す。図-7(a)は医療用 CT の水平断面画像であり、1スライス間隔で 5枚、鉛直方向 1.25 mm の範囲を表示している。一方、図-7(b)は μ X 線 CT の水平断面画像であり、1スライス間隔で 20枚、鉛直方向 1.16mm の範囲を表示している。各画像において、1枚目と最後の画像は概ね同位置の水平断面画像であり、いずれも 256 階調のグレースケール画像であるが、ImageJ においてコントラストを調整しているため、画像の濃淡と CT 値は対応していない。以降、高解像度の μ X 線 CT 画像によるグラウト充填状況の分析を行う。

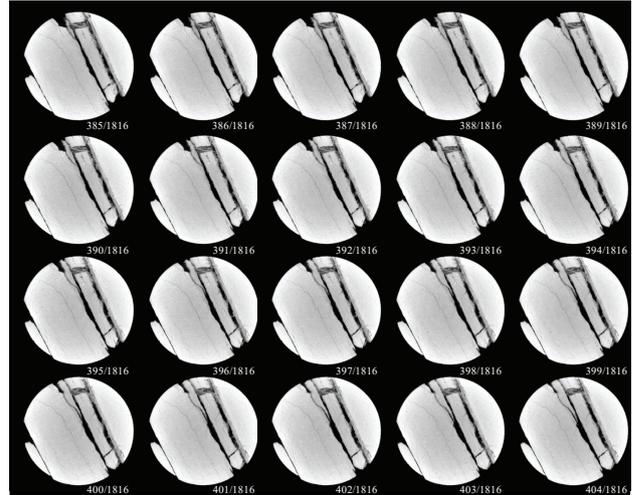
図-8 に μ X 線 CT 画像に対して ImageJ を用いて各層の領域抽出を行い、CT 値の観点から各コアにおけるグラウト充填状況の分析を行った結果を示す。結果は、図-5 に示す個所と同じである。各図の右下は、代表的な水平断

表-3 μ X 線 CT の撮影条件

X-ray tube voltage [kV]	150.0	FDD [mm]	1050
X-ray tube current [μ A]	400	FCD [mm]	300
Slice thickness [mm]	0.058	Pixel size [mm]	0.05319
Matrix size	1024	Magnification	4.759
Number of projections	2253	Integrated Images	15



(a) 医療用ヘリカル CT スキャナ

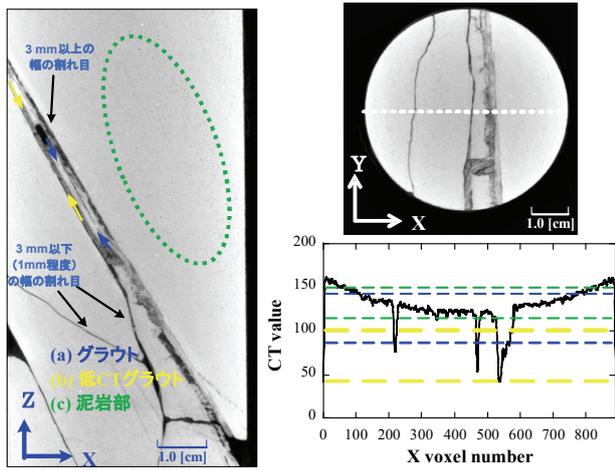


(b) μ X 線 CT

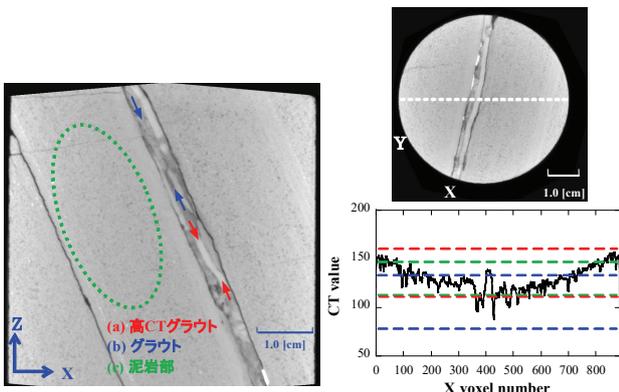
図-7 14.43 m 付近の水平断面の連続画像

面画像のある測線に沿った CT 値のプロファイルである。各層ごとに正規分布を仮定し、95%信頼区間である $\mu \pm 1.96\sigma$ を各層ごとに示している。

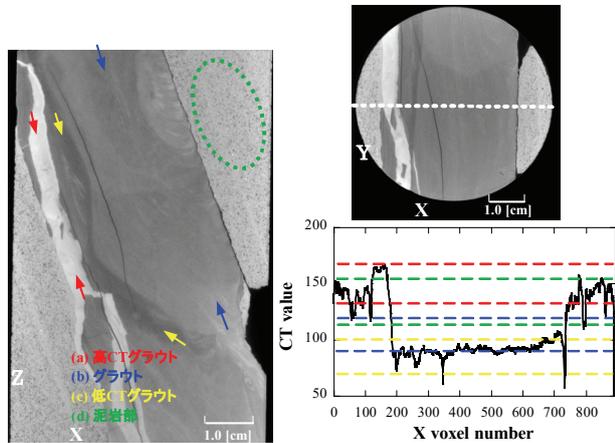
図-8(a)では、幅最大 5 mm、角度 60 度の主割れ目に、CT 値 117 の中 CT グラウト、74 の低 CT グラウトが充填している。中 CT グラウトは、割れ目幅が 3 mm 以下であると図の上部側の岩石に付着、3 mm を超えると割れ目中央に充填している、その他の部分には低 CT グラウトが充填している。また、主割れ目以外にも、幅 1 mm 以下の割れ目が複数存在し、低 CT グラウトが充填されている。図-8(b)では、幅最大 4.2 mm の主割れ目に、CT 値 135 の高 CT グラウトと 103 の中 CT グラウトが密に充填しており、基本的に図の上側に高 CT グラウトが位置しているが、一様に充填しているわけではなく、グラウト濃度の高低の区別は難しい。また、医療用 CT で空隙のように映された個所は、ここでは目視でも充填が確認できる。図-8(c)では、幅 30 mm の層理沿いの割れ目に、CT 値 151 の高 CT グラウト、105 の中 CT グラウト、85 の低 CT グラウトが密に充填しており、高 CT グラウトは図の下側に、中 CT グラウトは割れ目中央から図の上側にかけて、低 CT グラウトは高 CT グラウトの周囲に充



(a) 14.43 m 地点 (14.43~14.60m)



(b) 18.70 m 地点 (18.70~18.80m)



(c) 26.50 m 地点 (26.40~26.80 m)

図-8 μX線 CT で抽出された CT 画像と代表的な水平断面画像の CT 値分布

填している。また、測線プロファイルより、μX線 CT 画像は voxel サイズが小さくより高精度なため、水平断面中央に位置する微小な割れ目を CT 値の観点からも確認することができる。

図-9は、14.43 m 付近の CT 画像を割れ目に沿った平面でスライスしたものである。(a), (b)のスライスでは低 CT グラウトが割れ目を十分に充填していることが確認でき

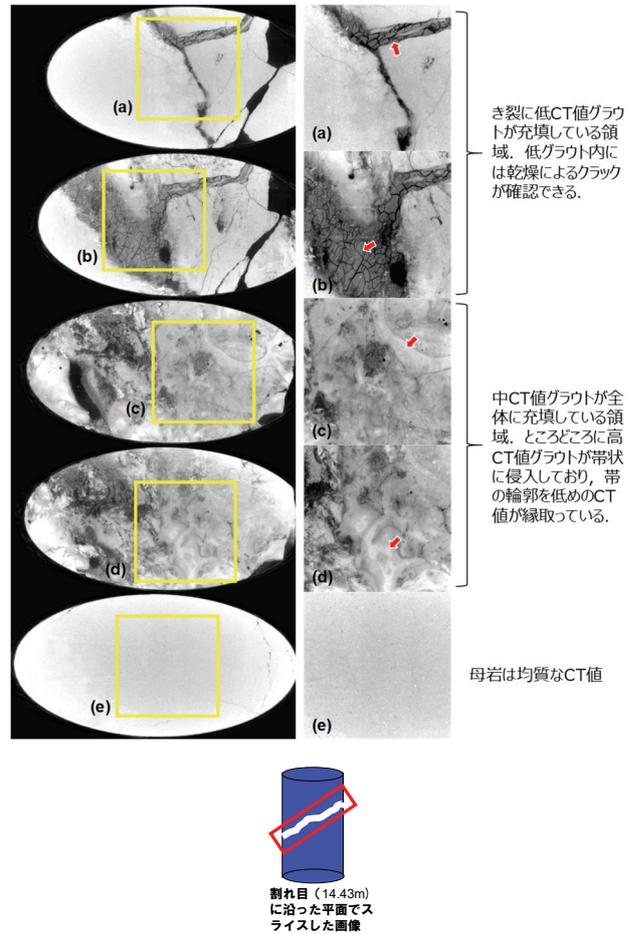


図-9 割れ目に沿ったスライス断面画像

る。低 CT グラウト内の細かいクラックは、コア回収後の乾燥によるものである。(c), (d)のスライスは全体がグラウトで覆われている。岩石部とグラウト部の CT 値が近いため CT 値ではその識別を判断しづらいが、低中高 CT グラウトがまだら模様となって分布しているのが特徴である。(c), (d)の赤い矢印で示す位置には高 CT グラウトが帯状に侵入しており、その帯の輪郭を低めの CT 値が縁取っている。(e)のスライスは割れ目やグラウトのない母岩部で、均質な CT 値を示している。

μX線 CT の分析結果を表-4 に、CT 値の分布を図-10 に示す。充填されているグラウトの層については、ほとんど医療用 CT の結果と差異は無かった。しかし、領域抽出において画像の精度やミクセルの影響は非常に大きい。割れ目幅の大きい箇所では、CT 画像から 3 種類のグラウト材が充填されていると想定できるが、表-4 に示すように、得られた CT 値の分析からも 3 種類の CT 値の分布に分類でき、3 種類のグラウトが注入されていたことが確認できる。ダムグラウチング施工において用いられたグラウトの配合は、水セメント比が 1.5, 0.8, 0.6 の 3 種類である。確認孔である B-17 孔を掘削する以前に近傍のボーリング孔でグラウトが施工され、注入圧が所定の値に達しないステージでは、水セメント比を 0.8 や 0.6 とし

て実施されている⁸⁾。結果として、3種類のグラウト層がCT画像から確認された。医療用CTの分析と同様に充填状況を比較する。割れ目幅が30mmを超える26.50mコアにおいて医療用CTと同様に3層のグラウトが確認された。CT値は、26.50mではより高い圧力でグラウトが注入され、結果としてCT値が高くなったと考えられる。2層のグラウトが充填されている深度(14.43, 18.70, 22.00, 27.50m)については、割れ目幅は2mm以上である。破砕帯である27.50mコアを除くと、14.43mと18.70m深度には同じような充填傾向が確認でき、3mm以下の割れ目の場合は、CT値の高いグラウトが割れ目の上部に位置する岩石に付着する。一方、3mm以上の割れ目の場合、割れ目中央にCT値の高いグラウトが充填し、その周囲を低いCT値のグラウトが覆う。また、22.00mで多く確認されたCT値190の高CTグラウトについて、18.70mでも一部確認でき、いずれも割れ目の上側の岩石に付着している。また、一層のグラウトのみ充填している深度(19.80, 22.40m)について、割れ目幅はいずれも1.5mmで全体的にグラウトのCT値は一様であり、割れ目の上側のグラウトのCT値が若干高い傾向が確認できる。

(3) グラウト充填状況の分析

図-11は、砂岩・泥岩それぞれについてのCT値のヒストグラムを示している。砂岩・泥岩ともに岩石部のCT値のヒストグラムの分布形状は類似している。砂岩と比較して泥岩は、CT値が高く、密度が高いことを示している。いずれも岩石実質部のCT値は一定の範囲にあることが確認できる。

図-12は、充填しているグラウトをCT値によって低CTグラウト・中間グラウト・高CTグラウトと分類したCT値ヒストグラムである。分類は、17BLに注入されたグラウトの水セメント比が、1.5, 0.8, 0.6の3種類であったことから、今回撮影を行ったすべての箇所を確認されたCT値90~120程度のグラウトを中間グラウトとし、岩部以上のCT値(130程度)を高CTグラウト、主要グラウトのCT値未満を低CTグラウトとした。また、各深度・層によって抽出したグラウト部のボクセル数が異なるため、抽出量を揃えて比較を行っている。図-12より、低CTグラウトと中間グラウトは、CT値の分布にあまりばらつきは見られず、低CTグラウトではCT値が75を中心に、中間グラウトはCT値が100を中心に分布している。一方で、高CTグラウトは、低CTグラウトや中間グラウトよりばらつきが、おおよそCT値が150を中心

表-4 μX線CTを用いた画像解析

Depth (m)	Rock		Fracture size (mm)	Grouting CT value ($\mu(\sigma)$)		
	Type	CT value ($\mu(\sigma)$)		low	middle	high
14.43~14.60*	Mudstone	134.5(8.17)	4.8	73.9(14.11)	116.9(12.08)	
18.70~18.80*	Mudstone	129.3(8.55)	4.2		103.4(14.82)	135.4(11.97)
19.80~19.90*	Sandstone	129.8(9.30)	1.5		94.0(13.61)	
22.00~22.20*	Mudstone	133.2(6.07)	0.5~2.0		101.8(10.24)	190.4(19.79)
22.40~22.50*	Mudstone	137.0(8.39)	1.5		93.7(20.77)	
26.50~26.80*	Sandstone	134.3(10.09)	32.6	85.0(7.61)	104.9(8.75)	151.1(10.13)
27.50~27.60*	Mudstone	100.3(11.32)	9.7	77.8(10.32)		148.5(13.04)

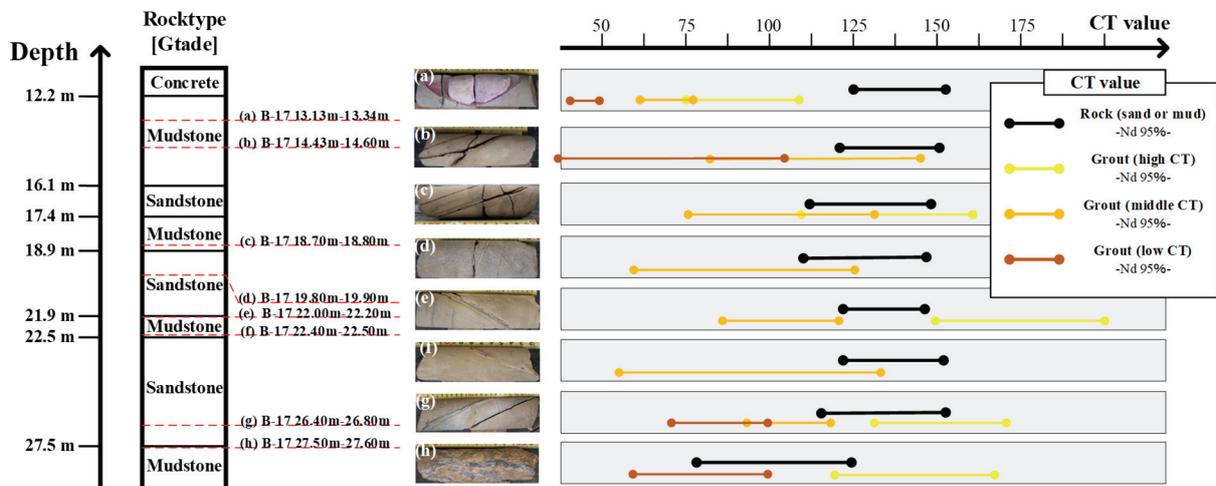


図-10 μX線CT撮影地点でのCT値の分布

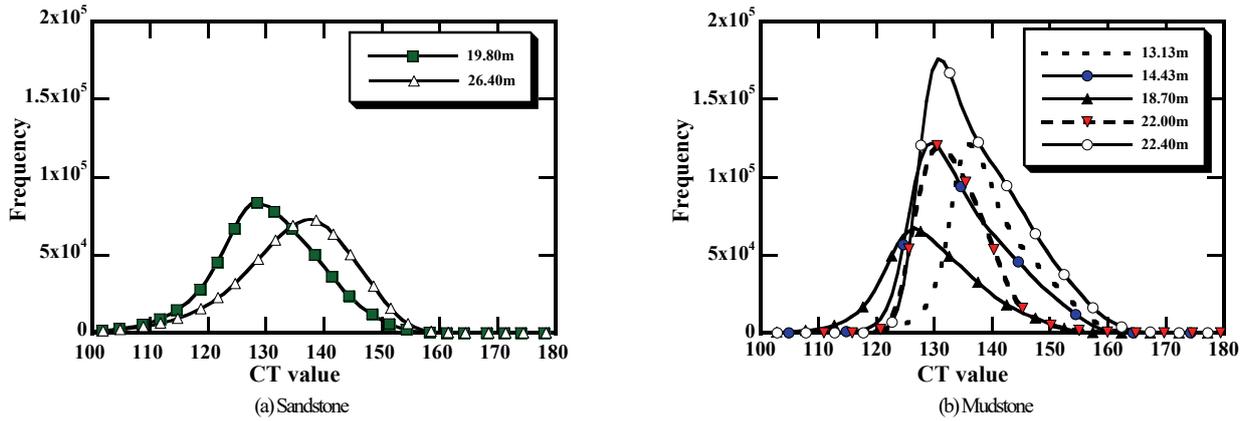
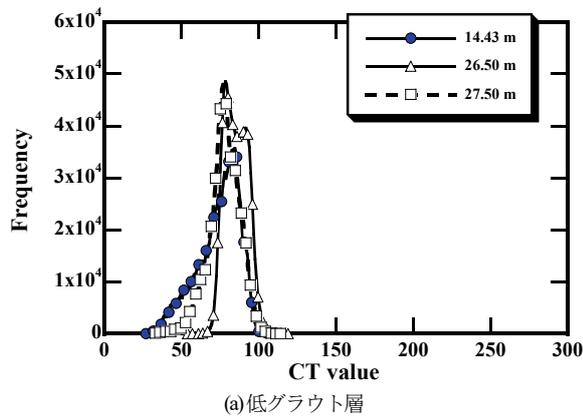
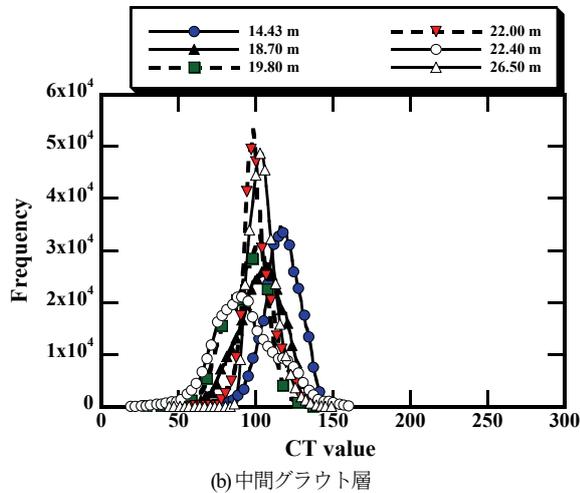


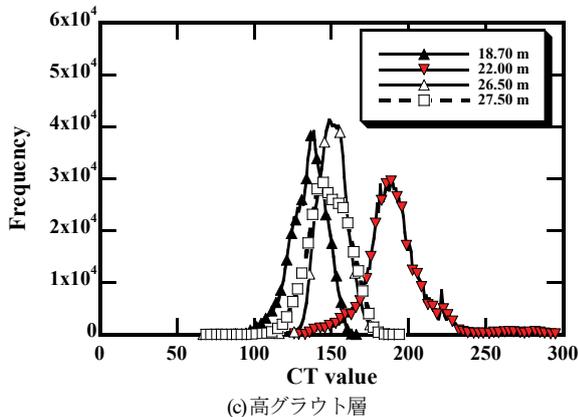
図-11 岩石実質部分のCT値のヒストグラム



(a) 低グラウト層



(b) 中間グラウト層



(c) 高グラウト層

図-12 割れ目でのCT値のヒストグラム

に分布している。中間グラウトのCT値分布形状について、複数層のグラウトが充填されている深度と比較して一層のグラウトのみ充填された深度の方が、CT値分布形状が幅広いことがわかる。

6. まとめ

本研究では、Modified GIN工法が適用されたグラウチング施工現場において、医療用CTおよび μ X線CTにより取得したグラウト充填ボーリングコアCT画像に対して、画像解析を行うことでグラウト充填状況の分析および考察を行った。両者の大きな違いとしては、医療用CTは本来医療の分野で用いられるため、高い線量により短時間での撮影が可能である一方、ノイズによる影響や最小計測精度がスライス厚0.25mmピッチであるためミクセルの影響が大きい。 μ X線CTは産業用に設計されているため、低い線量を用い撮影が長時間かかる一方、ノイズによる影響が少なく、スライス厚も0.058mmピッチと高精度でありミクセルの影響が少ない。

これらの影響について、表-2および表-4を参照すると、ミクセルの影響により領域抽出結果に関しても割れ目幅に違いがある。一般に、グラウトの充填挙動は、割れ目幅に大きな影響を受けることが知られており、割れ目幅の正確な評価は非常に重要である。本研究のように割れ目幅3mm以下のコアのCT画像を分析する場合、 μ X線CTによる撮影の方が効果的であるといえる。加えて、割れ目幅と同様にグラウト層の領域抽出においても、グラウト層のCT値は岩部や割れ目内の空隙部に近い場合もあり、ミクセルやノイズの影響が小さいほど正確な評価ができることから、 μ X線CTによるCT画像を用いることが望ましいと考える。グラウト層の分析結果については、本研究で行った分析手法では大きな違いは確認できなかった。原因としては、本研究では目視と手作業によりImageJを使用して各領域を抽出している。そのため、

明確に判断できる領域のみを抽出しており、不確実な境界については領域に含めていないからであると考えられる。

本研究で対象とした17BLでは、3種類の配合のグラウト材料が注入された。CT画像解析から、割れ目幅が小さい場合(1.5 mm以下)ではCT値が低い薄いグラウト材で注入されており、単一のグラウト材のみで充填されている。割れ目幅が小さい場合、注入後の分離も生じにくく、また、濃いグラウト材は密度が相対的に大きいため割れ目に浸透しにくいと考えられる。一方、割れ目幅が大きい場合、複数のグラウト材が確認された。これは、原位置では濃度の薄いグラウト材を注入し、その後所定の圧力に達しない場合、濃度の濃いグラウトの注入を行っている。割れ目幅の広いところは、先行して注入された濃度の薄いグラウト材に濃度の濃いグラウト材が繰り返し注入された結果であると考えられる。本研究では、X線CTによるコアの非破壊観察を通じて、グラウト充填状況の確認を行ってきた。濃度の異なるグラウト材をCT値から識別し、特に割れ目への侵入状態を把握できたことにより、日本のダムグラウチング工法で期待されるような効果が、Modified GIN工法でも得られることが確認できたことは大きな成果である。

謝辞：医療用CTの撮影は、一般財団法人電力中央研究所で実施した。μX線CTの撮影では、京都大学工学研究科木戸隆之祐助教の協力を得て実施した。また、岡本政明氏(株)ニュージェック顧問からは、施工との比較に関する助言を頂いた。記して謝意を表す。

参考文献

- 財団法人国土技術研究センター編：グラウチング技術指針・同解説，2003。
- 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。
- Stille, H., Gustafson, G. and Hassler, L.: Application of new theories and technology for grouting of dams and foundations on rock, *Geotechnical and Geological Engineering*, Vol. 30, pp. 603-624, 2012.
- Carter, T. G., Dershowitz, W., Shuttle, D. and Jefferies, M.: Improved methods of design for grouting fractured rock, *Proceedings of the Fourth International Conference on Grouting and Deep Mixing*, pp. 1472-1483, 2012.
- Lombardi, G.: Grouting of rock masses, *Third International Conference on Grouting and Ground Treatment*, pp. 1-42, March 2003.
- Al Kuisi, M., El Naqa, A. and Shaqour, F.: Improvement of dam foundation using grouting intensity number (GIN) technique at Tannur Dam site, South Jordan, *Electronic Journal of Grouting Engineering*, Vol. 10, pp. 1-16, 2005.
- Rafi, J. Y. and Stille, H.: Applicability of using GIN method by considering theoretical approach of grouting design, *Geotechnical and Geological Engineering*, Vol. 33, pp. 1431-1448, 2015.
- 吉津洋一，藤井隆弘，中村和男，川田達也：カーテングラウチングに適用した Modified GIN 工法の提案と適用性の検証，電力土木，No. 402, pp. 21-28, 2019。
- Sadeghiyeh, S. M., Hashemi, M. and Ahalloeian, R.: Comparison of permeability and groutability of Ostur Dam site rock mass for grout curtain design, *Rock Mechanics and Rock Engineering*, Vol. 46, pp. 341-357, 2013.
- 土山明，上杉健太郎，中野司：高分解能 X 線 CT 法による岩石・鉱物の 3 次元構造の研究 - 太陽系初期物質のコンドリュール -，地学雑誌，Vol. 109, No. 6, pp. 845-858, 2000。
- 高橋学，竹村貴人，加藤昌治：マイクロフォーカス X 線 CT を用いた拘束圧下における岩石の構造観察について，応用地質，Vol. 45, No. 4, pp. 192-196, 2004。
- 中島善人：X 線 CT で岩石中の空隙をイメージングする，地学雑誌，Vol. 114, No. 6, pp. 1032-1043, 2005。
- 高橋学，藤野翔，竹村貴人，道口陽子：マイクロフォーカス X 線 CT を用いた拘束圧および間隙水圧変化による岩石の変形挙動観察について，応用地質，Vol. 48, No. 5, pp. 253-257, 2007。

(Received May 13, 2020)

(Accepted September 22, 2020)

IMAGE ANALYSIS AND EVALUATION ON GROUTING CONDITIONS
EMPLOYED MODIFIED GIN GROUTING METHOD
THROUGH μ -FOCUS X RAY CT

Yoichi YOSHIZU, Kyosuke ISEKI, Hiroataka ISEKI, Shinichiro NAKASHIMA
and Kiyoshi KISHIDA

The Modified GIN method which arranged the mix proportion of the grouting material, the injected pressure and the amount of the injected grouting material and considered as the safety and the quality assurance has been developed and employed at a construction site. In order to evaluate the grouting performance through Modified GIN method, in this research, CT images of borehole core samples are taken through both medical X ray CT and μ -focus X ray CT and are analyzed. Based on the CT images, it is confirmed that the grouting material are filled into the aperture of fracture. In the wide aperture, it is also confirmed that the filling grouting material consists of some layers. In the actual construction, the low density grouting material was injected in the first step, and then the high density grouting material was injected if the proposed injected pressure was not arrived in the first step. It is thought, therefore, that the CT images show the good agreement with the actual construction process.