

第8章 施工品質の変動を考慮した合理的な品質管理手法の提案

第6章ではフィルダム建設工事に行う施工・品質管理について現状と課題を整理し、今後のフィルダム施工・品質管理の方向性を検討した。

第7章では、設計ならびに材料、施工、品質管理などについて、新しいコンセプトとこれに応じた先駆的な取り組みが提案、実践されている台形CSGダムの品質管理について整理した。CSGの品質管理では、「施工初期に行う確認作業」を通じて得たデータに基づいて、施工を通じて行う「安定期の品質管理方法」を合理的に設定している。また、「変動傾向監視」という考え方を導入している。これらは、フィルダムの品質管理にはない新しい考え方である。

フィルダムをはじめとする土木構造物建設工事の品質管理において、材料管理と工法管理（施工プロセス管理）が品質確保の両輪であることはいうまでもない。近年ではICTによる工法管理が多くの適用実績を挙げており、施工プロセスのリアルタイムかつ全数管理が可能となっている。一方、材料管理についてはリアルタイムかつ全数管理が可能な技術が確立されていないため、現在でも従来の定時または定量間隔で実施する抜取検査方式を主体としている。つまり、リアルタイムな材料管理技術が実現できれば、従来の画一的な品質管理から、材料の品質変動に応じて試験項目や頻度を切り替える合理的な品質管理が可能になると考える。

以上のことから、今後のフィルダム施工・品質管理の方向性は、**材料管理ならびに工法管理にリアルタイムな管理技術を導入し、施工品質の変動を考慮した合理的な品質管理への転換**であると考えられる。

著者は、自身の施工経験などを通じて、フィルダムなどの土構造物の材料管理のうち、最も基本的で試験に時間と労力を要する「粒度」に着目した。そして、粒度変動の監視が可能である「デジタルカメラ画像を用いた土質材料の粒度変動監視システム」(**画像粒度モニタリング®**)を開発し、これを実用化した。開発、実用化した技術は、粒度のリアルタイムな変動傾向監視が可能であり、フィルダム施工・品質管理のさらなる高度化に資することができる。

第8章では、台形CSGダムである当別ダム(2章(7)参照)、殿ダム(2章(6)参照)などで実績を挙げた「デジタルカメラ画像を用いた土質材料の粒度変動監視システム」(**画像粒度モニタリング®**)とこれを用いた施工品質の変動を考慮した合理的な品質管理手法について論ずる。

8.1 デジタルカメラ画像を用いた土質材料の粒度変動監視システムの開発

8.1.1 概要

著者は、近年飛躍的な発展を遂げている画像解析技術に着目し、デジタルカメラで撮影した土質材料の画像を解析して、粒度分布の変動傾向を迅速に監視するシステム(**画像粒度モニタリング®**)を開発した。そして、本システムを台形 CSG ダムの本格的施工第一号である当別ダム(北海道石狩郡, **2 章(7)**参照)に導入し、CSG 施工当日における品質管理の合理化を図った。

また、ロックフィルダムの使用材料のうち、ダム堤体の地震時安全性の観点から粒度分布と締固めが重要とされている⁸⁻¹⁾ロック材にも適用可能であることを確認し、殿ダム(鳥取県鳥取市, **2 章(6)**参照)のロック材の品質管理に試行的に導入した。

一連の研究、開発、ならびに実施工現場への導入を通じて、画像粒度モニタリングシステムの実用性を確認するとともに、ICT による工法管理と組み合わせることによって実現する「**施工品質の変動を考慮した合理的な品質管理手法**」を提案した。

なお、本システムの開発と実施工現場への導入実績については、(社)ダム工学会が選考する平成 23 年度ダム工学会技術開発賞、および平成 25 年度ダム工学会論文賞を受賞している。

本システムに関する登録済み特許は以下のとおりである(2014 年 4 月現在)。

- ・ 特許 4883799 号 : 地盤材料の粒度計測システム及びプログラム
- ・ 特許 05234649 号 : 地盤材料の粒度計測システム及びプログラム
- ・ 他 4 件出願中

8.1.2 開発の着想

フィルダムなどの建設現場に従事する技術者は、写真-8.1 や写真-8.2 に示すような現場で使用する土質材料の表面状況を見て、粒度が「粗い」または「細かい」という評価を行っており、こうした目視感覚による評価が粒度試験結果と“案外”一致するという経験をすることが多い。このときの現場技術者は、土質材料の表面状況（二次元情報）に基づいて粒度分布を評価していると考えられる。

著者は、土質材料の表面状況を定量化できれば、これに基づいて粒度分布が判定できる可能性があると考えて、本システムの開発に着手した。



写真-8.1 フィルダム施工現場における盛立材料まき出し状況（フィルタ材）



写真-8.2 フィルダム施工現場における盛立材料まき出し状況（コア材）

8.1.3 システム構成

本システムの開発に当たっては、ブラックボックス的な要素を排した単純なシステムを志向した。システムは、主に市販のデジタルカメラ(1220 万画素程度)とコンピュータ(以下、PCと称する)、フラッシュで構成されており、特殊な装置を必要としない。

CSG 材(最大粒径 80mm)の撮影状況を写真-8.3 に、ロック材(最大粒径 1m)の撮影状況を写真-8.4 に示す。



写真-8.3 CSG 材の撮影状況



写真-8.4 ロック材の撮影状況

8.1.4 測定方法

(1) 測定手順

測定手順を図-8.1に示す。一連の画像解析(図-8.1中、STEP 2～STEP 5)は専用プログラムによって十数秒で処理が完了する。なお、粒度インデックス I_i とは、二次元の画像情報を定量化した独自の指標であり、8.1.6で詳述する。

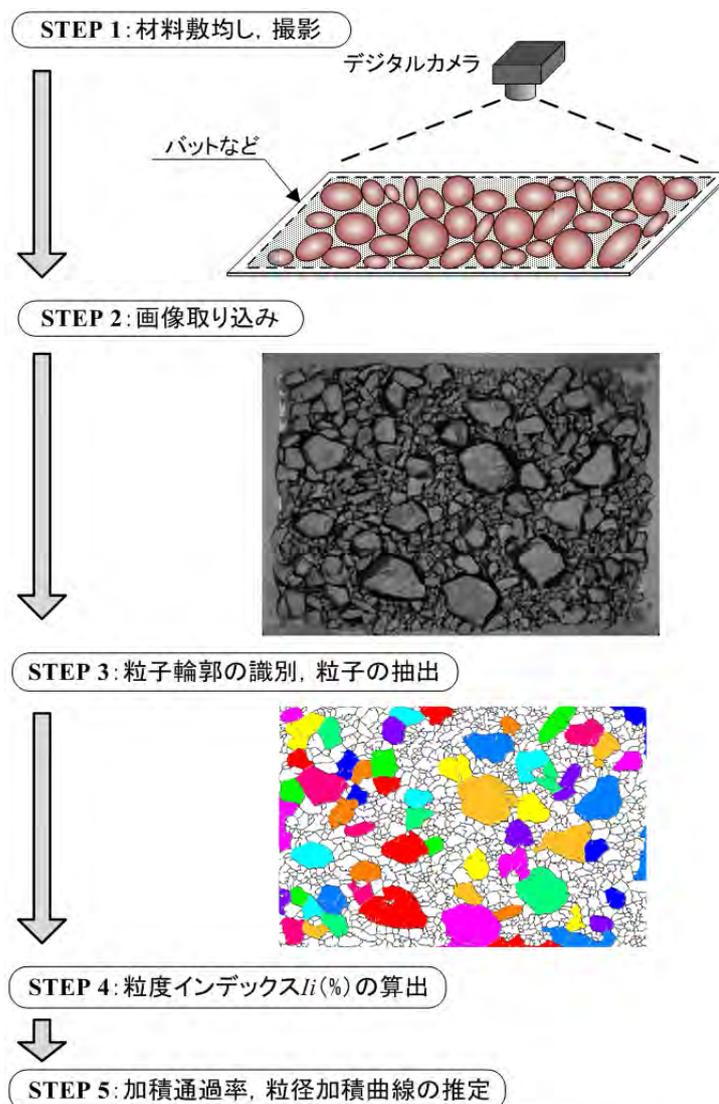
STEP 1 :測定対象材料を水平かつ薄く敷き均して、デジタルカメラで撮影する。

STEP 2 :撮影画像を解析プログラムを内蔵したPCに取り込む。

STEP 3 :画像を解析し、各粒子の輪郭を識別し、複数の監視粒径(例えば、40mm, 20mm, 10mm など)毎に粒子を抽出する。

STEP 4 :監視粒径毎に粒度インデックス I_i を算出する。

STEP 5 :監視粒径毎の粒度インデックス I_i から粒径加積曲線を推定する。



* STEP 2～STEP 5:所要時間:十数秒

図-8.1 画像粒度モニタリングの手順

(2) 面密度

デジタルカメラ画像解析の再現性を確保するためには、測定対象材料の敷均し状態を一定にすることが重要となる。例えば、測定対象材料の最大粒径に対して1回の測定に供する試料量が少ないと試料毎の粒度のばらつきが大きくなる。さらに、1回の試料量に対して敷均し面積が広いと粒子間に隙間が生じる、または敷均し面積が狭いと層厚が厚くなり比較的小さな粒子が埋まってしまうなどの問題がある。

そこで、本システムでは試料質量を敷均し面積で除して求める「面密度」(g/cm^2 または kg/m^2) が一定になるように敷き均すことで、再現性を確保することとした。

なお、実務においては「面密度」を変化させながら材料を撮影し、最適と考えられる面密度を設定する。

(3) システム出力例

本システムでは、画像撮影から十数秒で測定対象材料の粒径加積曲線を推定することができる。本システムによる粒径加積曲線の出力例を図-8.2に示す。

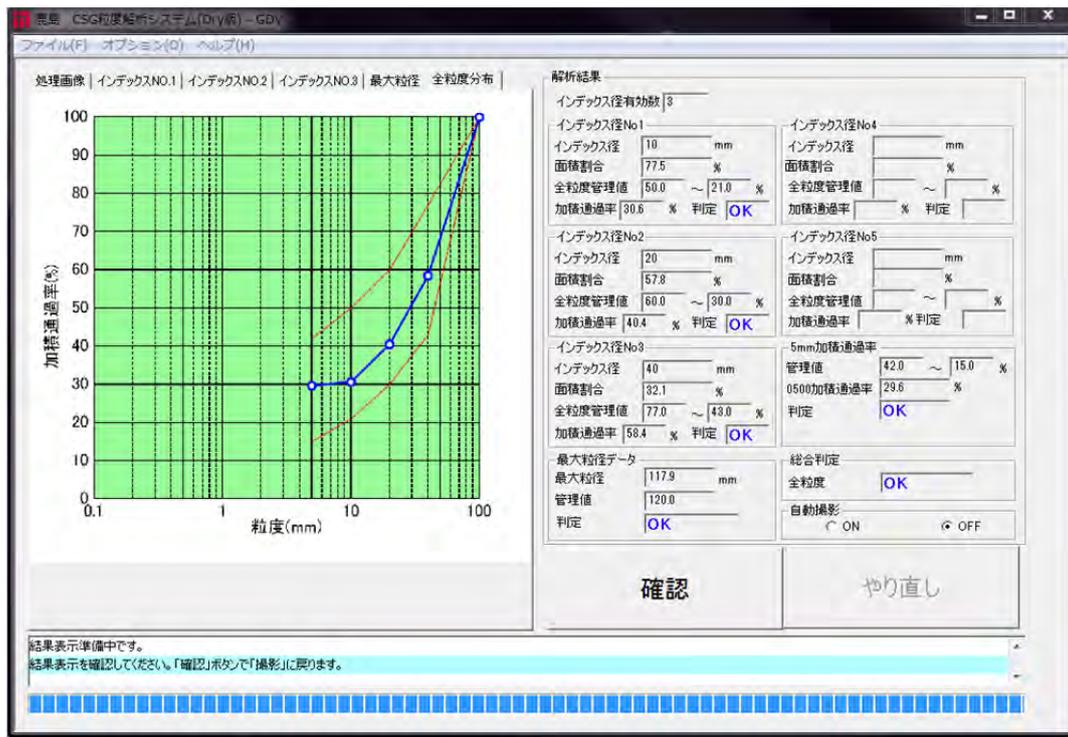


図-8.2 画像粒度モニタリングシステムの出力例

8.1.5 撮影画像と画像解析結果の例

CSG 材(最大粒径 80mm)の撮影画像と画像解析結果の一例を図-8.3 に示す。

図-8.3 はある CSG 材の最粗粒材料と最細粒材料⁸⁻²⁾を撮影、解析したものであり、両画像を比較すると粒子の大きさなどが明らかに相違している。つまり、別途撮影する測定対象材料の画像を最粗粒材料と最細粒材料の両画像と定量化して比較すれば、測定対象材料の粒度が“ひし形理論”(7.4 参照)に基づいて規定される CSG 材の粒度範囲(最粗粒度と最細粒度に挟まれる範囲)を満足するかが判定できる。

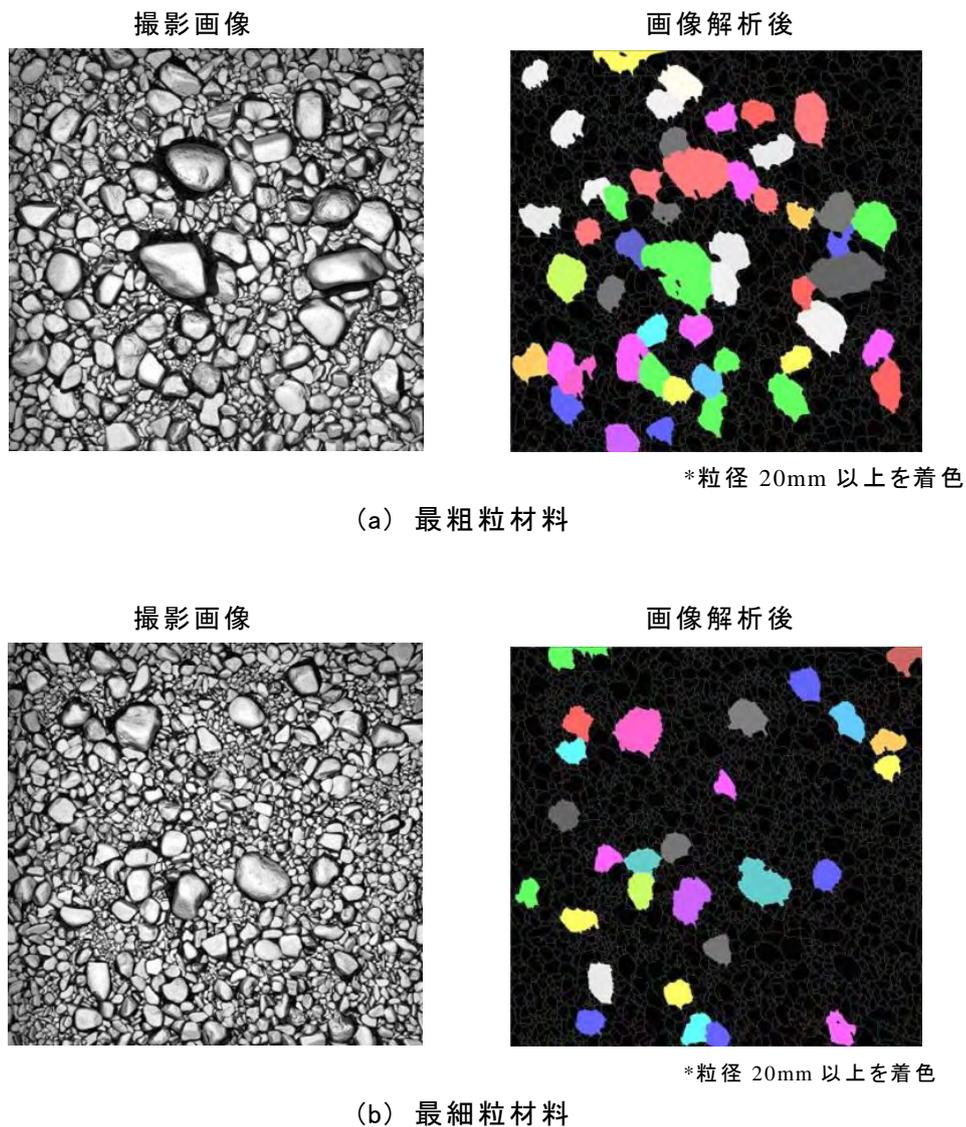


図-8.3 CSG 材の撮影画像と画像解析結果の一例

8.1.6 粒度インデックス

(1) 定量化指標の検討

本システム開発初期段階において、土質材料を撮影したデジタルカメラ画像（二次元画像情報）の定量化指標の検討を行った。検討ではある CSG 材（最大粒径 80mm）の単一粒子（粒径 10mm 以上，粒子 30 個）を対象に，岩石の密度試験（JGS 2132-2009，浮力法）とデジタルカメラ画像解析を行い，単一粒子の乾燥質量と画像解析で求めた投影面積を比較した。その結果，図-8.4 に示すように両者は良好な相関関係を持つことが確認できた。

なお，図-8.4 中には粒子の投影面積を円，3 次元的形状を回転楕円体（3 径のうち等しい 2 径の半径と，異なる 1 つの半径を持つ楕円体）と仮定して描いた曲線を併記した。回転楕円体の体積は(8.2) 式で求め，これに絶対乾密度 (ρ_s) を乗じて粒子の乾燥質量を求めた。計算結果と比較すると，試験で求めた乾燥質量は粒子を球と仮定した場合（扁平率 $f=0$ ）よりも小さくなり，扁平率を 0.6~0.75 とした場合と比較的一致した。

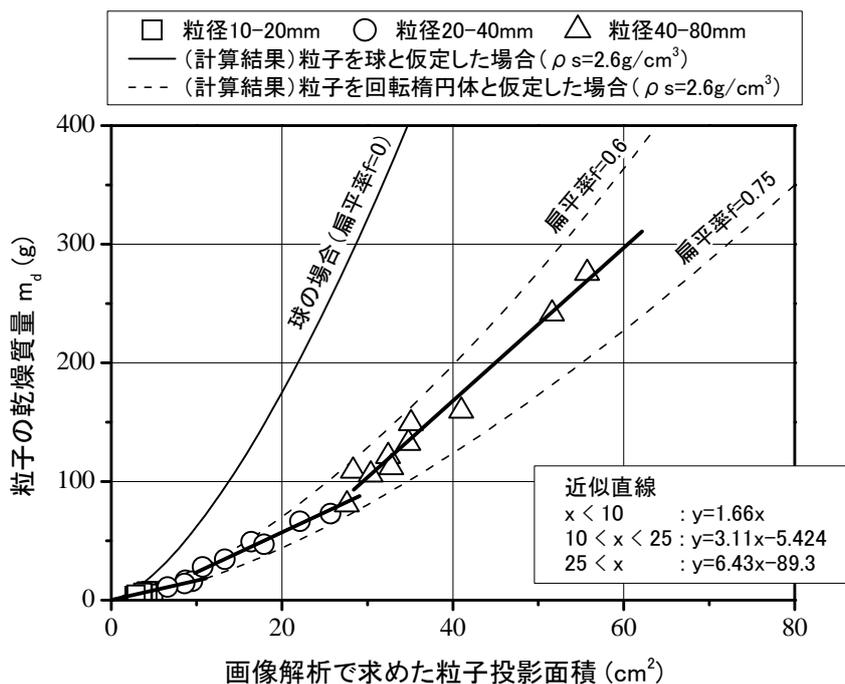


図-8.4 CSG 材の単一粒子の投影面積と乾燥質量の関係

【円および回転楕円体の計算方法】

円の面積 S と回転楕円体の体積 V は次式で表される。

$$S = \pi r^2 \tag{8.1}$$

$$V = \frac{4}{3} \pi r^2 a \quad (8.2)$$

ここに, a : 回転楕円体の回転半径

また, 扁平率 f は次式で表される。円もしくは球の場合 0 となる。

$$f = 1 - \frac{a}{r} \quad (8.3)$$

扁平率 f を導入すると, 回転楕円体の体積 V は(8.2)' 式のように書ける。

$$V = \frac{4}{3} \pi r^3 (1 - f) \quad (8.2)'$$

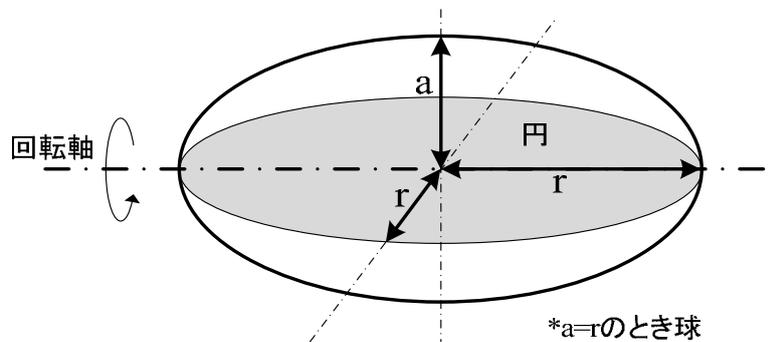


図-8.5 円と回転楕円体の半径の定義

(2) 粒度インデックスの定義

上記の検討結果から, 岩質が同等な材料である場合, 同じ粒径範囲の粒子であれば粒子の形状や絶乾密度もほぼ同等であると考えられるので, 画像解析で求める各粒子の投影面積から各粒子の乾燥質量が推定できると判断した。

実際にはさまざまな粒径の粒子が混在した材料を撮影することになるため, (8.4)式ならびに図-8.6の模式図に示すように監視粒径毎に累積した粒子投影面積を撮影全体面積で正規化することとし, これを粒度インデックス I_i と定義した。

一方, 加積通過率(通過質量百分率)も粒径毎に累積した乾燥質量を試料全体の乾燥質量で正規化した値であることから, 粒度インデックス I_i と良好な相関関係を持つと考えた。このことから, デジタルカメラで撮影した土質材料(二次元画像情報)の定量化指標に粒度インデックス I_i を用いることとした。

$$I_i = \frac{\sum S_d}{A} \quad (8.4)$$

ここに、 A : 測定対象材料の撮影全体面積 (図-8.6 中、 $W \cdot L$)

S_d : ある監視粒径 (d) 以上の粒子投影面積

※粒度インデックスは監視粒径毎 (ex.10mm 以上, 20mm 以上など) に算出する。

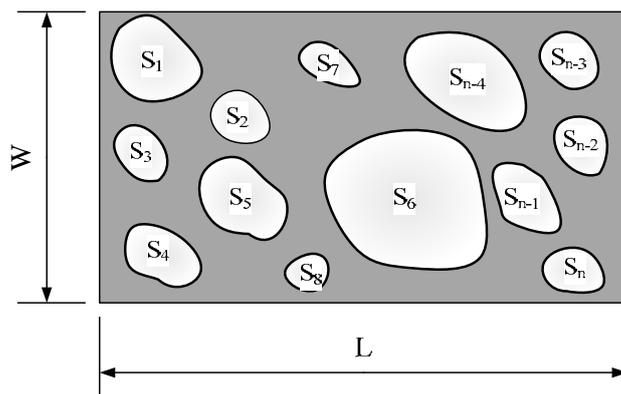


図-8.6 粒度インデックスの算出イメージ

(3) 粒度インデックスと加積通過率の関係

監視粒径毎に算出した粒度インデックス I_i と各粒径の加積通過率 (通過質量百分率) の関係例 (当別ダム CSG 材) を図-8.7 に、粒度インデックス I_i を求めた当別ダム CSG 材の粒径加積曲線を図-8.8 に示す。図-8.7 に示すように、両者は比較的良好な相関関係を持っており、この関係を近似した相関式を介することで、図-8.9 に示すように監視粒径毎の粒度インデックス I_i から加積通過率を算出し、粒径加積曲線を推定することが可能となる。

相関式は、同一試料を対象に本システムによる画像解析と粒度試験を行って設定する (以下、キャリブレーション試験と称する)。粒度インデックス I_i と加積通過率の関係を表す相関式の設定方法にはいくつかの方法が考えられるが、図-8.7 には実際の品質管理において粒度変動を敏感に感知することを意図して監視粒径毎 (例えば、40mm 以上, 20mm 以上, 10mm 以上) に相関式を設定した例を示した。また、図-8.7 の例では粒度インデックス I_i に対する加積通過率にばらつきが見られるが、複数の監視粒径毎に加積通過率を推定することで粒度インデックス I_i に対する加積通過率のばらつきの影響は低減されるので、“ひし形理論” (7.4 参照) に基づいて規定される CSG 材の粒度範囲を満足するかの判定は十分に可能である。

なお、著者がこれまでに収集したデータによると、粒度インデックス I_i と加積通過率の関係は測定対象材料によって若干異なることが分かっている。これは、測定対象材料

の岩質や粒子の扁平率などの違いによるものと考えており、今後のデータ収集と分析を通じてさらに考察を深める所存である。

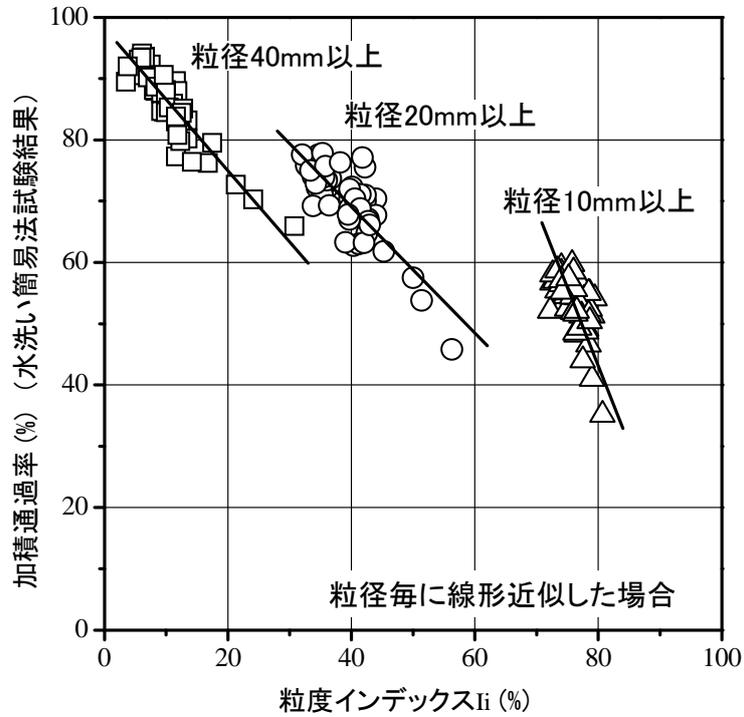


図-8.7 粒度インデックスと加積通過率の関係例
(当別ダム CSG 材, 河床砂礫, 最大粒径 80mm)

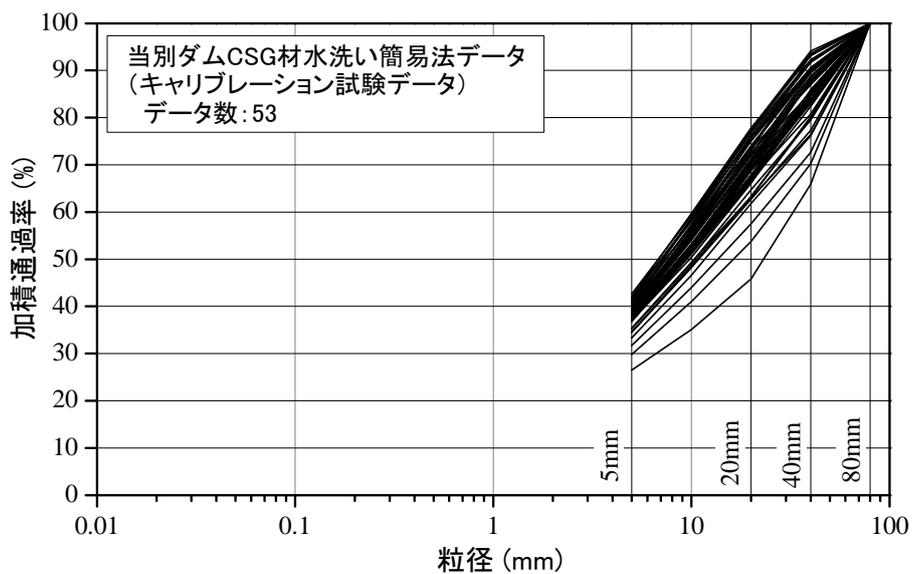


図-8.8 キャリブレーション試験に供した CSG 材の粒径加積曲線
(当別ダム CSG 材, 河床砂礫, 最大粒径 80mm)

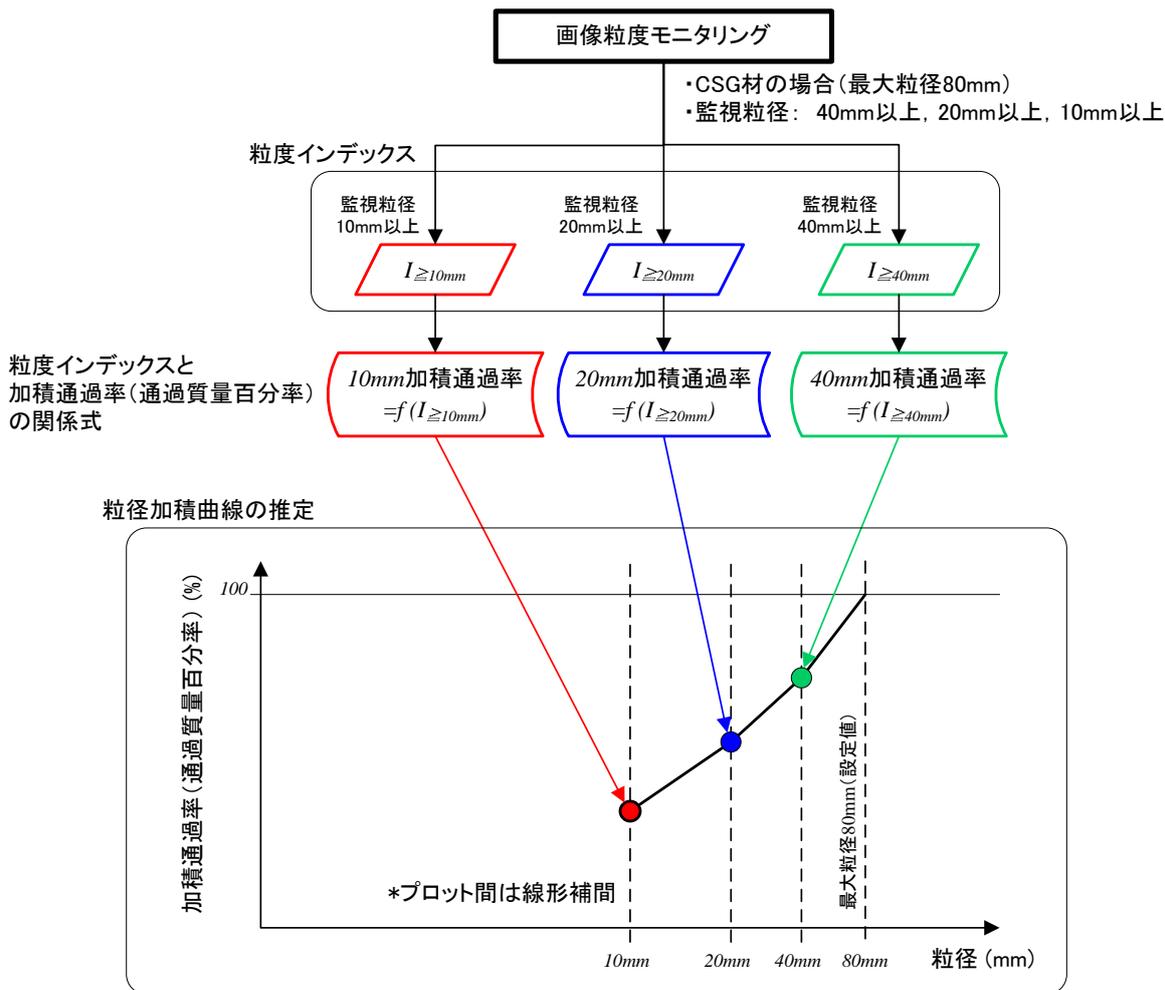


図-8.9 粒度インデックスからの粒径加積曲線の推定模式図

8.1.7 粒径加積曲線の推定例

本システムで推定したある CSG 材 16 試料の粒径加積曲線を図-8.10 に示す。

CSG 材の場合, 試料採取(湿潤状態で 30kg 程度)から本システムを用いて粒径加積曲線を得るまでに要する時間は 10 分程度以内であり, 通常 1 時間程度を要する台形 CSG ダム建設現場における湿潤・水洗い法による粒度試験⁸⁻²⁾(写真-7.16 参照)に比べて迅速に粒径加積曲線が得られる。

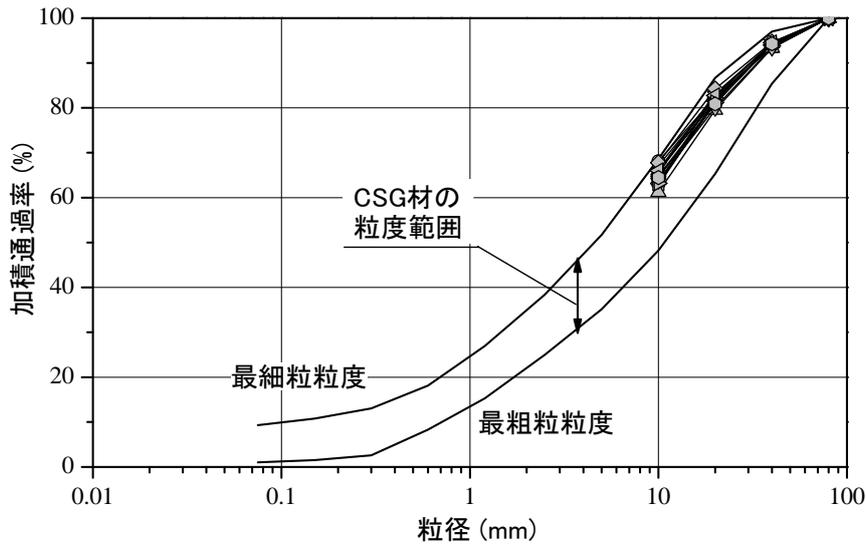


図-8.10 本システムで推定した CSG 材の粒径加積曲線の例

8.1.8 粒子識別の分解能と識別精度

現状のデジタルカメラ画像解析の粒子識別の分解能は最大粒径 (CSG 材の場合, 80mm) の 3%程度 (CSG 材の場合, 2.4mm 程度) である。一方, CSG 材は粒径 10mm 未満の粒子が団粒化することが多く, 本システムではこれを一つの粒子として認識してしまい, 粒子の識別精度が低くなってしまった。

このため, 実際に撮影した画像を対象に識別粒径を変化させた画像解析を行い, 団粒化の可能性が少なく, 安定して粒子が識別でき, かつ加積通過率との相関が比較的明確な粒径を模索した。その結果, 粒径 10mm (最大粒径の 12.5%) であれば粒子の識別精度も良好であり, 図-8.7 に示すように加積通過率との相関も良好であることが確認できた。このことから, 最少の監視粒径を 10mm に設定した。

なお, 本システムを導入する場合は, 粒子径と識別精度について上記と同様な検討を行い, 最少の監視粒径を設定することとした。

8.2 当別ダム品質管理導入時の諸検討

当別ダム(北海道石狩郡, 2章(7)参照)は, 堤高 52m, 堤頂長 432m, 堤体積 81.3 万 m³ の台形 CSG ダムである。

CSG 工法は「高速大量連続施工」を基本としており, これを実現するために, 従来よりも迅速かつ連続的な品質管理方法が必要とされている(7.5 参照)。このため, **画像粒度モニタリング**[®]システムの当別ダム建設事業本体工事への導入を検討することになった。

本節では, 本システムの当別ダム CSG 施工当日の品質管理への導入に先立って行った各検討結果について論ずる。

8.2.1 CSG 材の粒度変動傾向の分析

当別ダム CSG 材の粒度分布の変動傾向を確認するために, 湿潤・水洗い法による粒度試験⁸⁻²⁾(写真-7.16 参照, 以下, 水洗い簡易法)で得た粒径 40mm, 20mm, 10mm, 5mm の各加積通過率の相関性を検討した。各粒径の加積通過率の相関分析結果を図-8.11 に, 相関分析を行った CSG 材の粒径加積曲線を図-8.12 に, CSG 材の粒径加積曲線の変動模式図を図-8.13 に示す。

各粒径の加積通過率の相関分析の結果, 各粒径の加積通過率は相互に比較的高い相関性を持つことが確認できた。このことから, 図-8.13 に模式的に示すように, 所定の粒度範囲を逸脱する場合は全ての粒径(図-8.13 では, 40mm, 20mm, 10mm, 5mm)が逸脱すると考えられ, 例えば 40mm, 20mm, 5mm は所定の粒度範囲を満足するが 10mm だけが逸脱するということは考えにくいことが示唆される。

このことから, 本システムでいくつかの粒径の加積通過率が推定できれば, これに基づいて CSG 材の粒度が所定の粒度範囲を満足するかが判定できると判断した。



(再掲)写真-7.16 当別ダムにおける湿潤・水洗い簡易法の実施状況

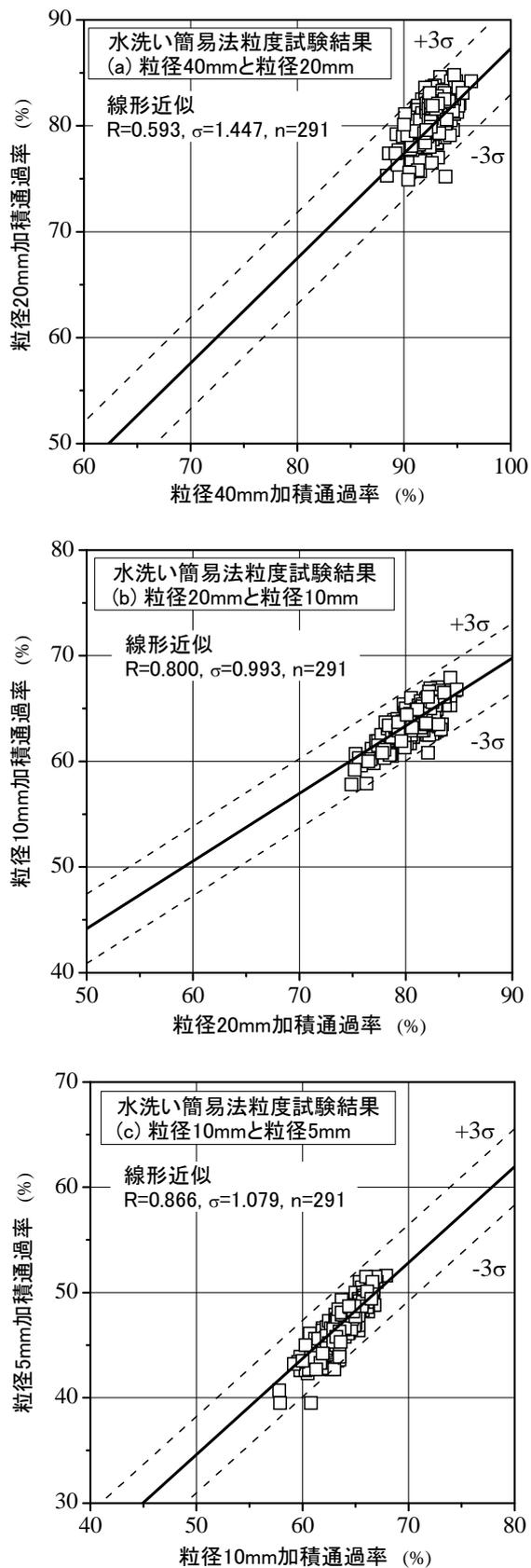


図-8.11 当別ダム CSG 材各粒径の加積通過率の相関検討結果

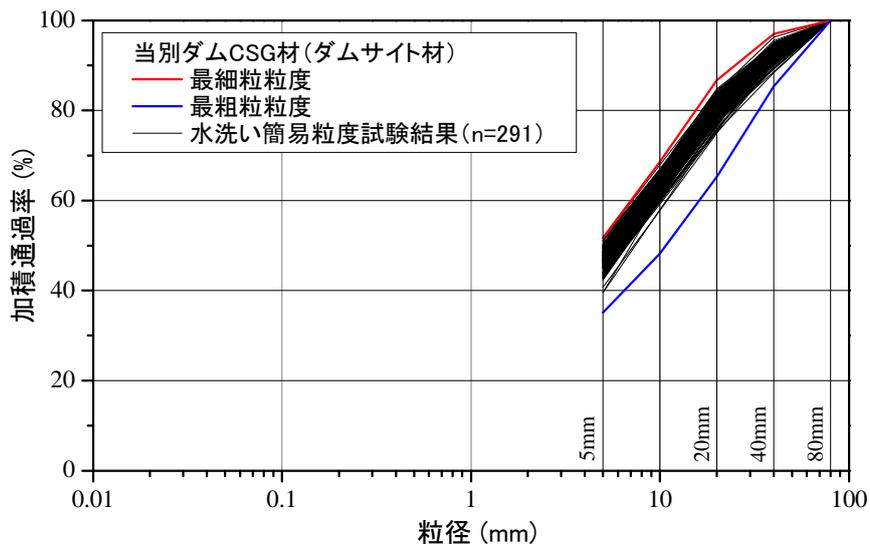


図-8.12 相関分析を行った当別ダム CSG 材の粒径加積曲線

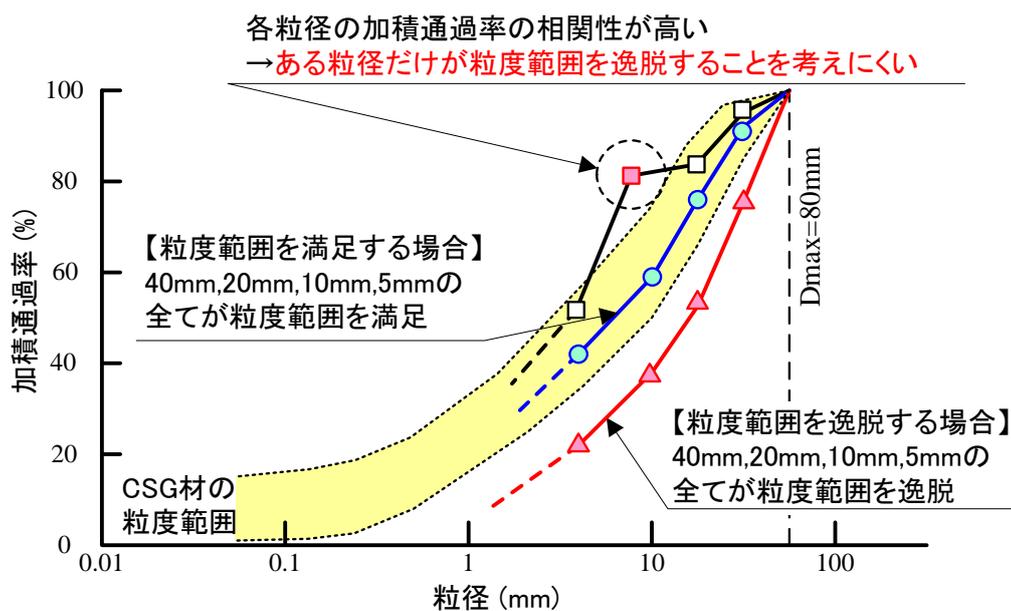


図-8.13 CSG 材の粒径加積曲線の変動模式図

8.2.2 水洗い簡易法結果と本システムの推定結果の比較

本システムによる加積通過率の推定精度を確認するために、同一のCSG材46試料を対象に本システムによる画像解析と水洗い簡易法を行い、それぞれの方法で求めた粒径40mm, 20mm, 10mmの加積通過率を比較した。それぞれの方法で求めた加積通過率の比較を図-8.14に、粒径加積曲線を図-8.15に示す。

図-8.14によると、両者の加積通過率は概ね一致し、その差異は±5%程度であることが確認できる。このことから、本システムによる加積通過率の推定精度は、水洗い簡易法とほぼ同等であると判断した。

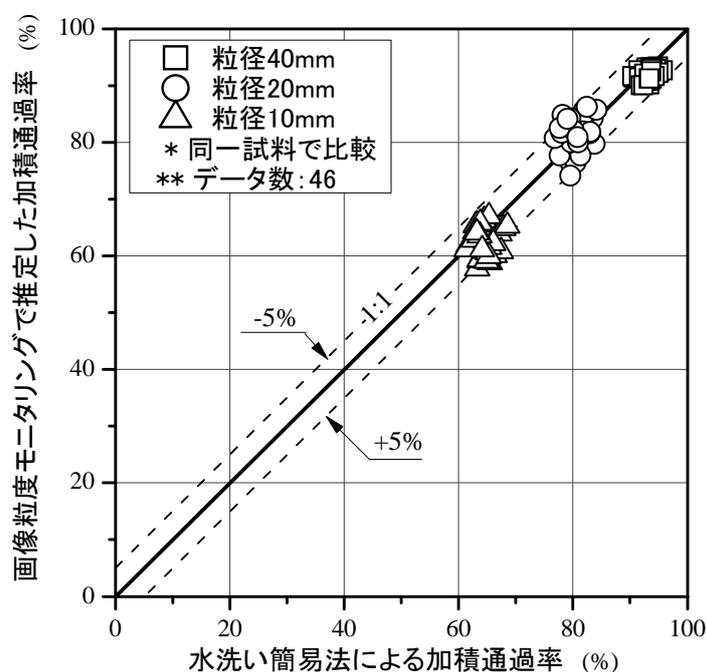
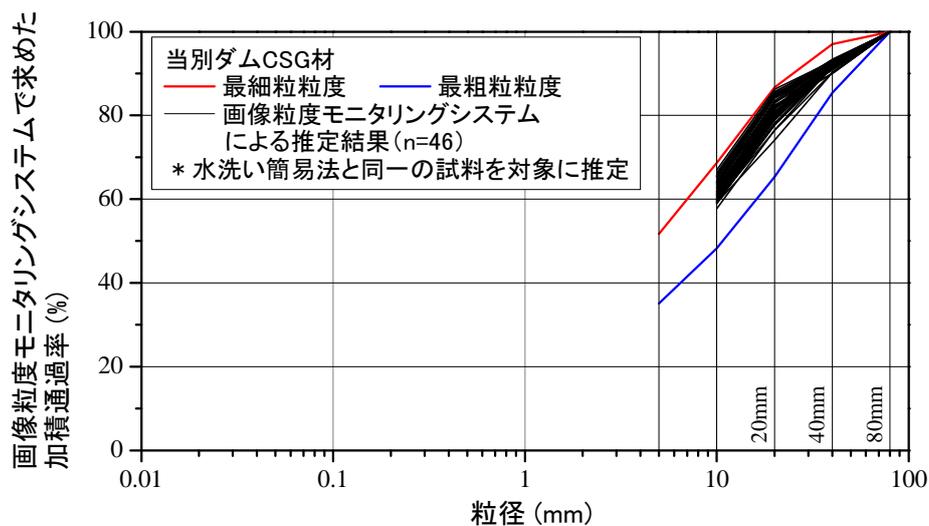
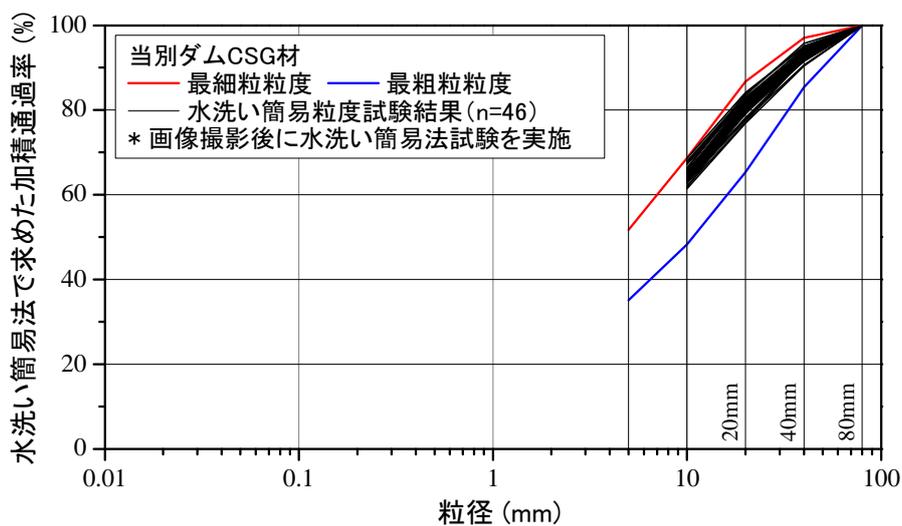


図-8.14 画像粒度モニタリングシステムと水洗い簡易法の比較



a) 画像粒度モニタリングシステムで推定



b) 水洗い簡易法による粒度試験結果

図-8.15 画像粒度モニタリングシステムと水洗い簡易法で求めた粒径加積曲線

8.2.3 粒径 5mm 加積通過率の推定方法

既述したように、CSG 材の場合、粒径 10mm 未満粒子の識別精度は他の粒径 (40mm, 20mm, 10mm) よりも低くなっていた。一方、当別ダム CSG 材の表面水量は粒径 5mm 加積通過率の影響度合いが大きく、本システムにおいてもこれを推定する必要があった。このため、図-8.11 に示したように各粒径の加積通過率は相互に比較的高い相関性を持つことを踏まえて、粒径 5mm 加積通過率の推定方法を検討した。

検討の結果、図-8.16 に示すように本システムで推定する粒径 40mm, 20mm, 10mm の加積通過率から、(8.5)式を介して粒径 5mm 加積通過率を推定することとした。(8.5)式中の係数 (a, b, c, d) は、当別ダムでの水洗い簡易法実績データを対象に重相関分析を行って設定した。重相関分析結果の一例を表-8.1 に示す。

$$y = ax_1 + bx_2 + cx_3 + d \quad (8.5)$$

- ここに、 y : 5mm 加積通過率
 x_1, x_2, x_3 : 40mm, 20mm, 10mm 加積通過率
 a, b, c, d : 実績データを対象とした重相関分析で求める係数

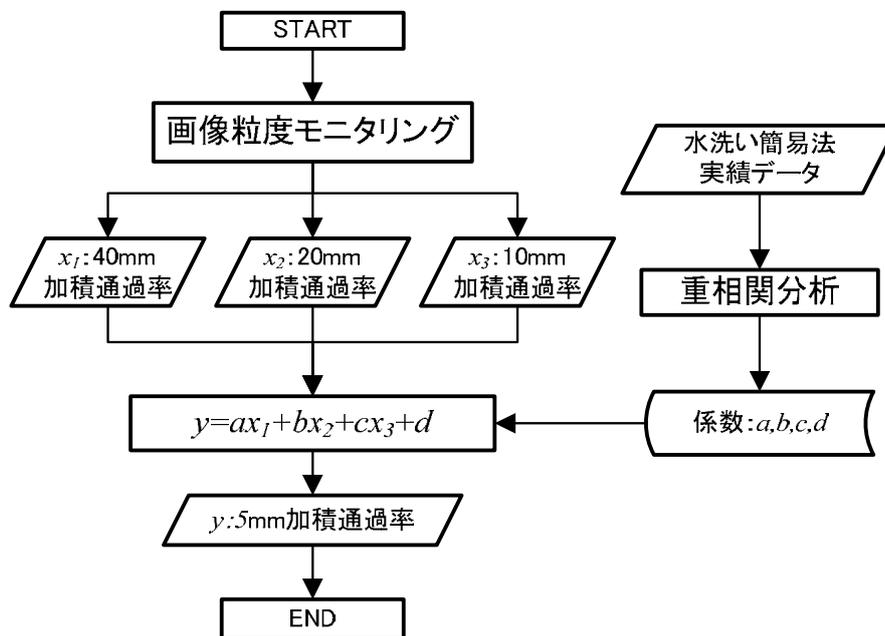


図-8.16 粒径 5mm 加積通過率の推定フロー

表-8.1 重相関分析結果の一例(当別ダム CSG 材)

y	係数				重相関係数 R
	粒径40mm	粒径20mm	粒径10mm	y切片	
	a	b	c	d	
5mm加積通過率	-0.087	0.273	0.437	3.245	0.917

8.2.4 当別ダム CSG 材粒径加積曲線の推定結果

当別ダム CSG 材の同一試料を対象に本システムで推定した粒径加積曲線と水洗い簡易法で得た粒径加積曲線の比較例を図-8.17に示す。図-8.17に示すように、それぞれの方法で求めた粒径加積曲線は良く一致している。

図-8.14 に示した同一の CSG 材 46 試料を対象に、(8.5)式で推定した粒径 5mm 加積通過率と水洗い簡易法試験結果の比較を図-8.18 に示す。図-8.18 によると、粒径 5mm 加積通過率は概ね一致し、その差異は±5%程度である。この推定精度は、対象とするのが元来ばらつきを有する地盤材料であることを考慮すると、実用上問題がないレベルであるといえる。

以上のことから、本システムで CSG 材の粒度分布(粒径 5mm~80mm)が水洗い簡易法と同等の精度で推定可能との結論に達した。

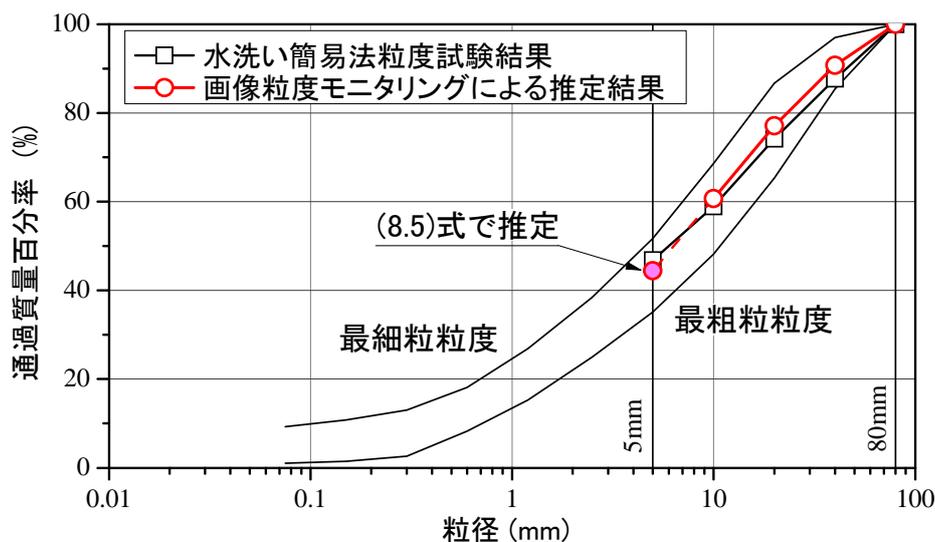


図-8.17 画像粒度モニタリングシステムと水洗い簡易法の粒径加積曲線の比較例(当別ダム CSG 材)

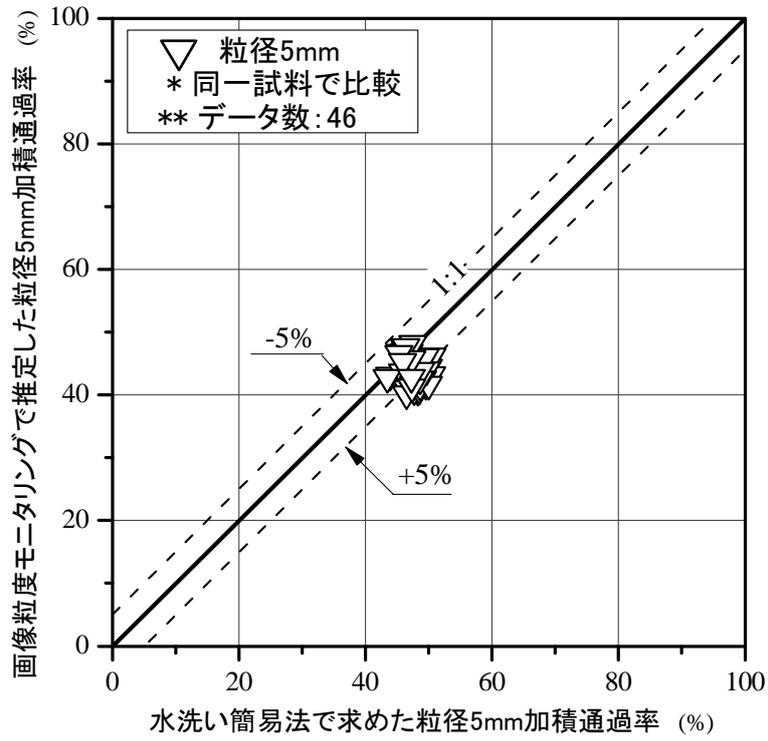


図-8.18 画像粒度モニタリングシステムで推定した粒径 5mm 加積通過率と水洗い簡易法結果の比較(当別ダム CSG 材)

8.3 当別ダムでの適用実績と品質管理の合理化

8.3.1 導入形態

8.2 で既述した導入時の各検討を経て、**画像粒度モニタリング[®]**システムを CSG 材の粒度変動傾向監視手法として当別ダム CSG 施工当日の品質管理に本格的に導入した。

当別ダム CSG 製造プラント横に設けたデジタルカメラ画像撮影小屋を**写真-8.5**に、CSG 材撮影状況を**写真-8.6**に示す。撮影小屋内には**写真-8.7**に示す解析プログラムを内蔵した専用 PC を設置し、画面タッチ操作で画像撮影と解析結果が確認できるようにした。また、LAN を使って試験室でも撮影画像と解析結果が確認できるようにした。

撮影小屋内では、日光や工事用照明などによる撮影条件の変化を抑制するため、**写真-8.6**に示すように撮影場所を四方を暗幕で覆った。

なお、CSG 材は 0.8m×1.2m の範囲に湿潤質量 30kg を敷き均し(面密度 31.25kg/m²)、高さ 1.5m から撮影した。

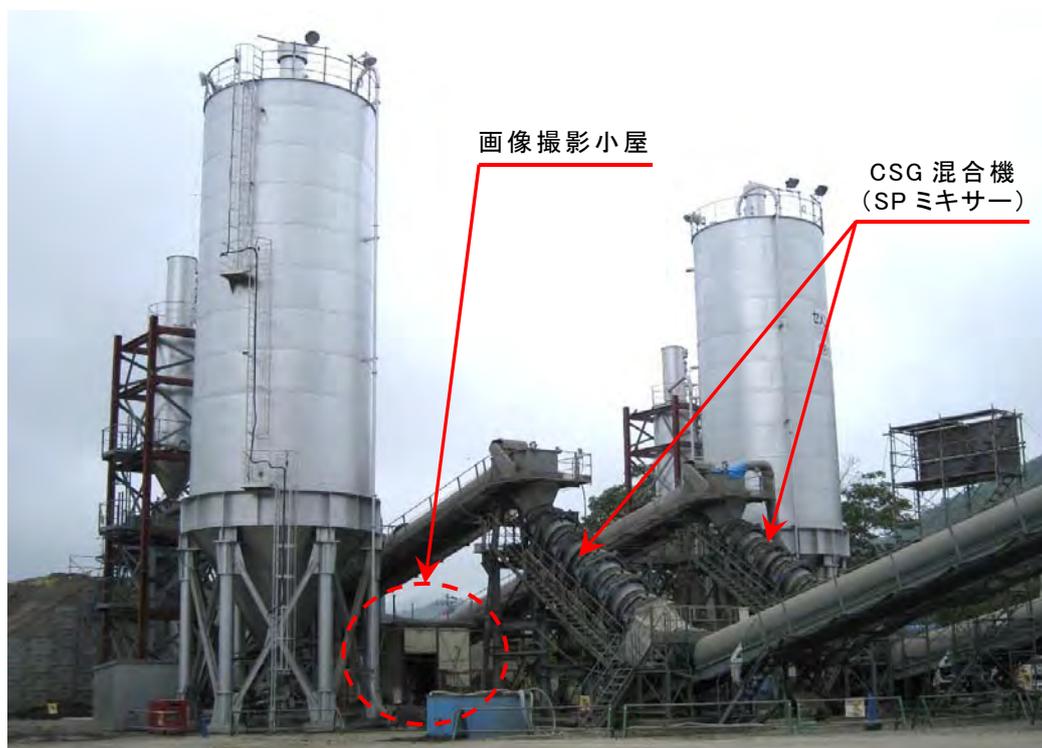


写真-8.5 当別ダム CSG 製造プラントと画像撮影小屋

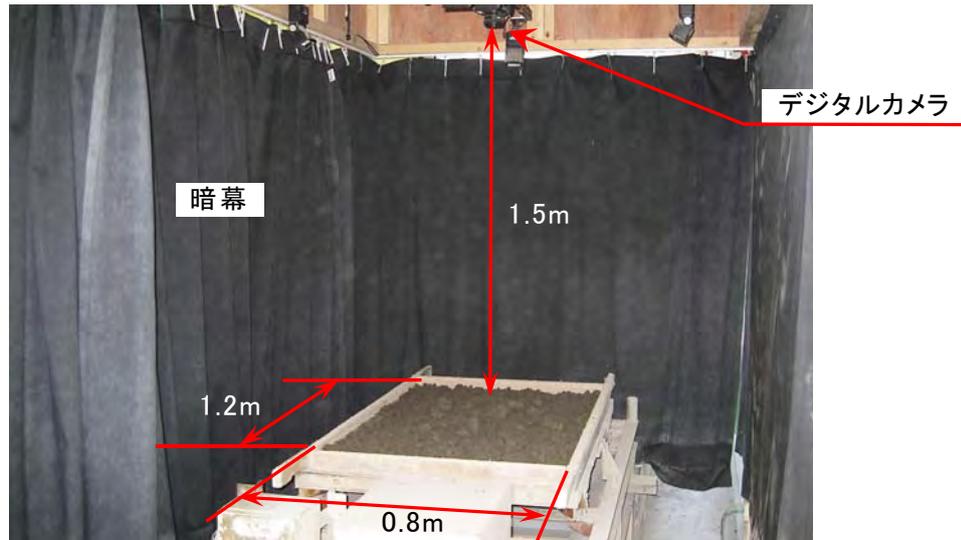


写真-8.6 CSG 材撮影状況



写真-8.7 解析プログラムを内蔵した専用 PC

8.3.2 CSG 材粒度変動監視結果例

本システムによる CSG 材の粒度変動監視結果例(粒径 40mm, 20mm, 10mm, 5mm)を図-8.19 に、粒径加積曲線の推定結果例を図-8.20 に示す。

図-8.19 は CSG 施工 3 日間(このとき, CSG 製造は夜間に実施)のデータであり, CSG 製造中は本システムを 1 回/15 分, 水洗い簡易法を 1 回/2~4 時間の頻度で実施した。なお, 人力による試料土採取~撮影・解析~試料土片付けは 10 分程度で完了するため, 1 回/15 分の本システムによる粒度変動監視は無理なく実施できた。

図-8.19 ならびに図-8.20 に示すように, 本システムで推定した加積通過率は水洗い簡易法の結果とほぼ一致しており, 本システムで CSG 材の粒度が所定の粒度範囲を満足していることが監視できている。

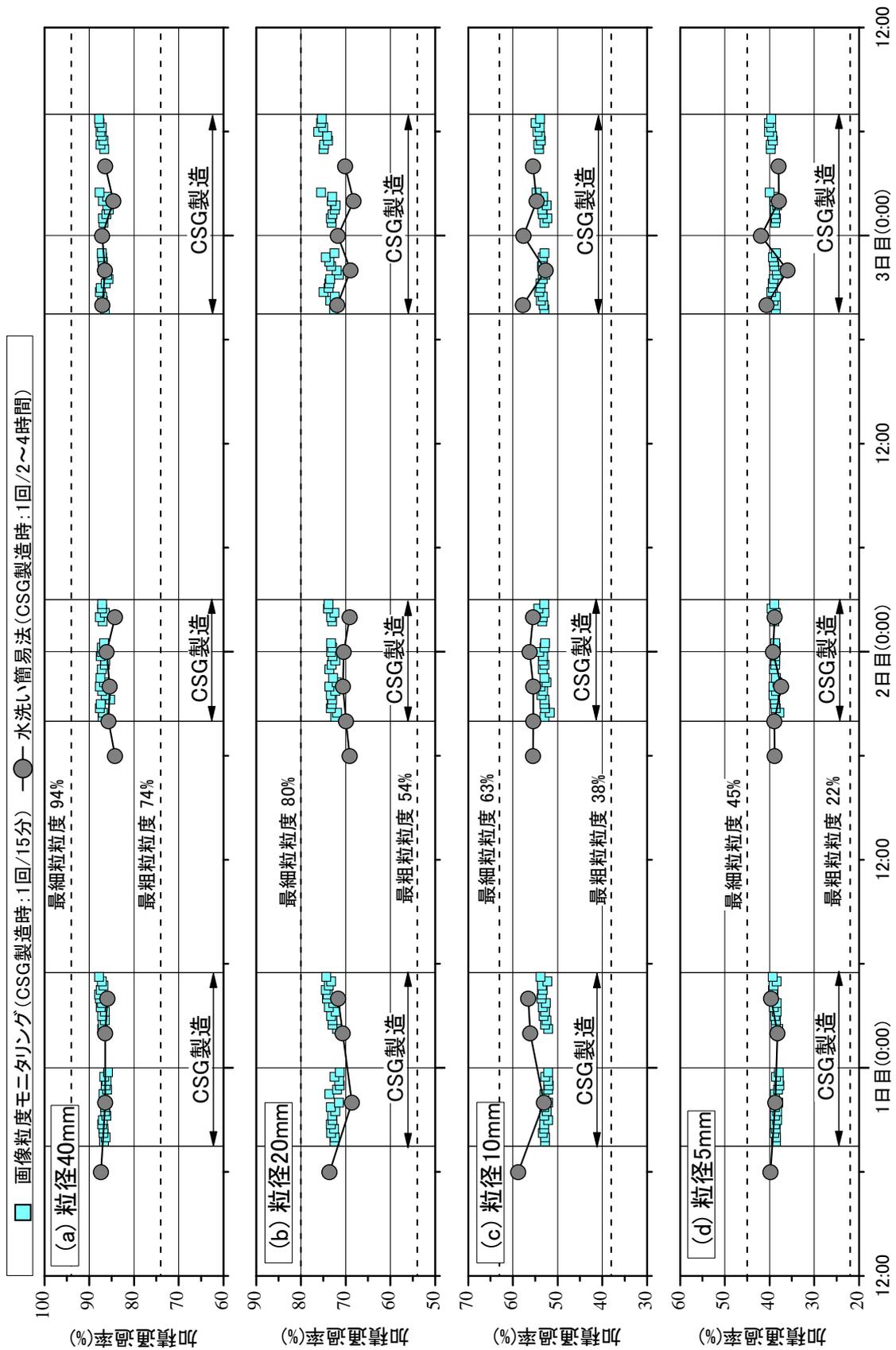


図-8.19 画像粒度モニタリングによる当別ダム CSG 材粒度変動監視結果例

●— 水洗い簡易法粒度試験結果 □— 画像粒度モニタリングによる推定結果

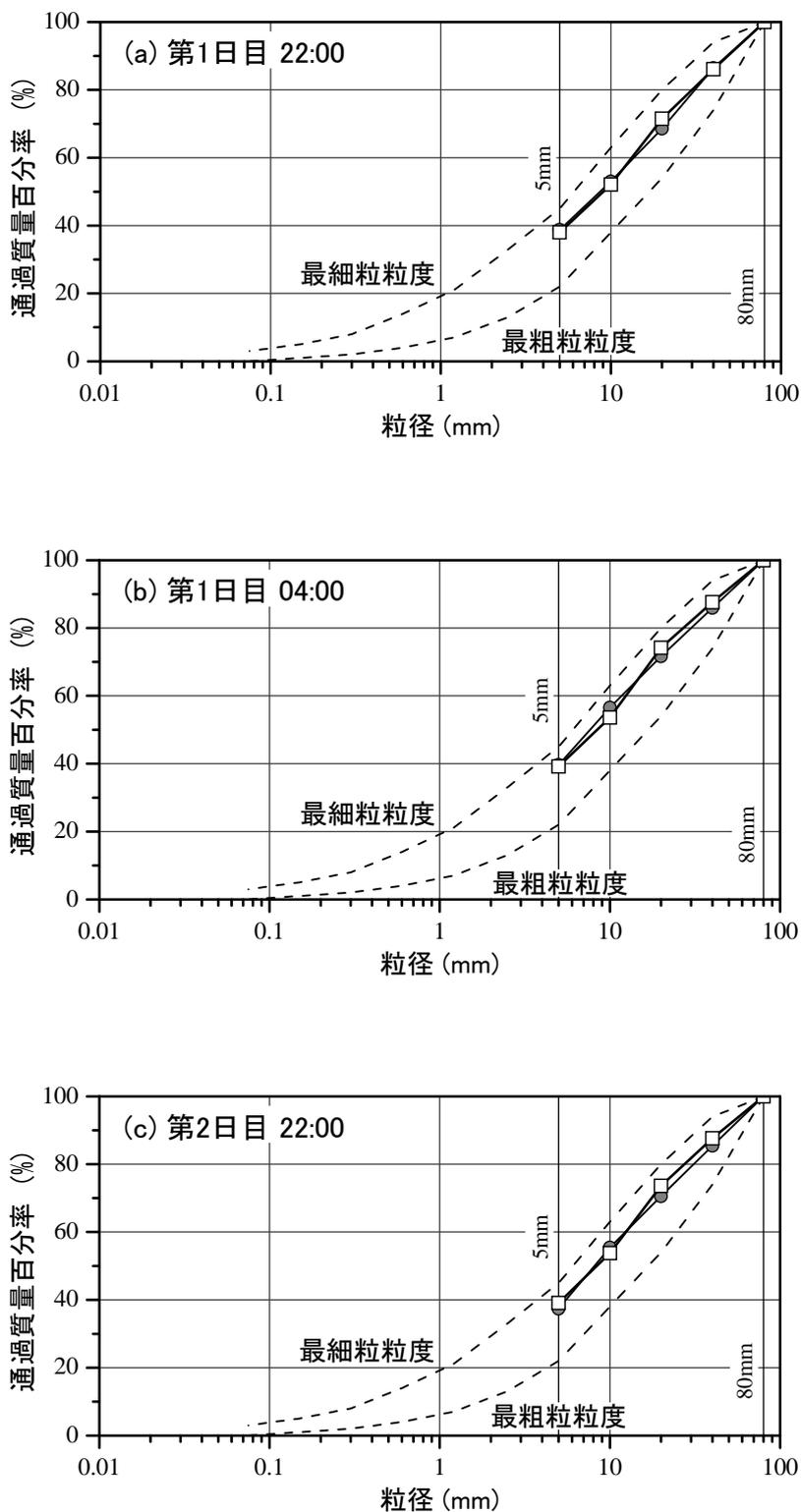


図-8.20(1) 画像粒度モニタリングで推定したCSG材の粒径加積曲線例

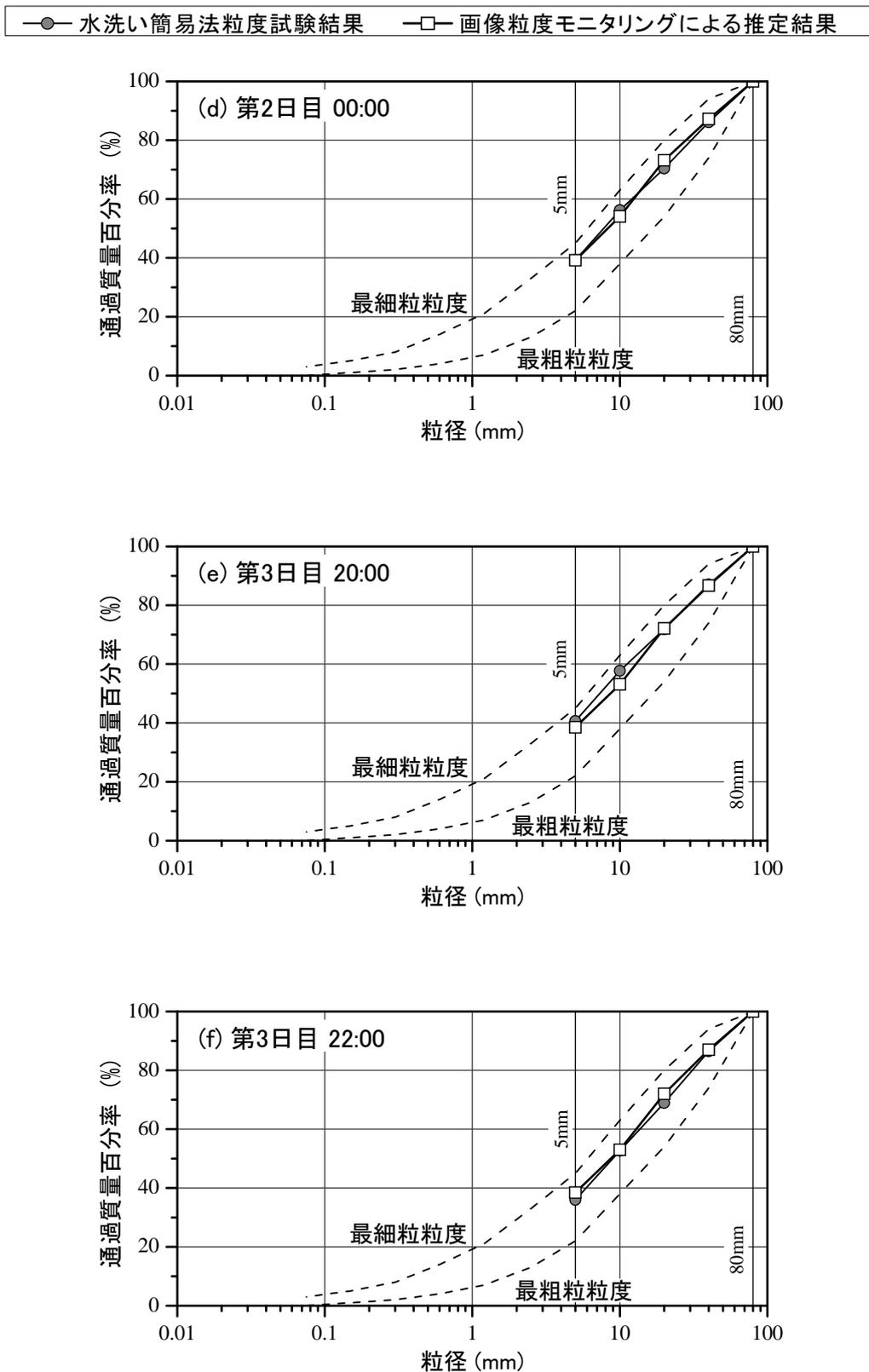


図-8.20(2) 画像粒度モニタリングで推定したCSG材の粒径加積曲線例

8.3.3 CSG 施工当日の品質管理の合理化

当別ダムでは、本システムによるCSG材粒度変動監視に加えて、RI(Radio Isotope:放射性同位体)水分計を使ったCSG材含水率変動監視技術⁸⁻³⁾(以下、RI法含水率モニタリングシステム)を導入し、CSG施工当日の品質管理の合理化を図った。

当別ダムCSG製造プラントへのRI水分計の取付状況を写真-8.8 および写真-8.9に示す。

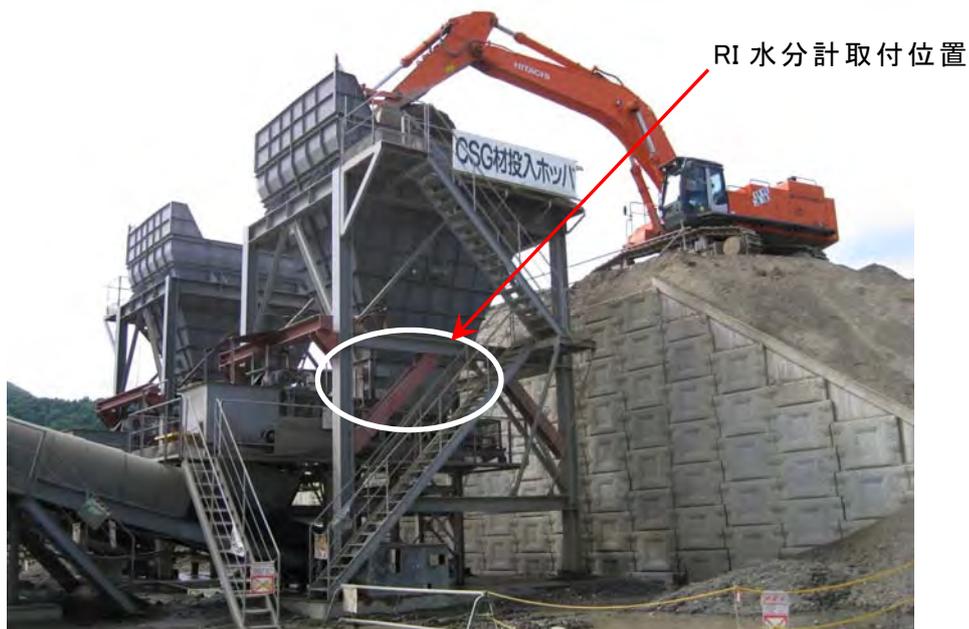


写真-8.8 RI水分計取付位置

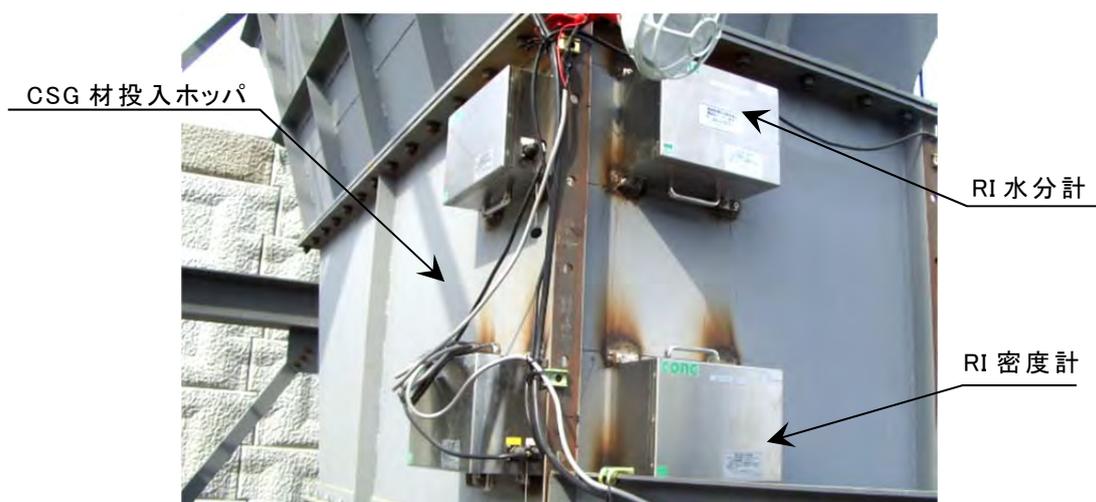


写真-8.9 CSG材投入ホツパ下部に取付けたRI水分計

(1) RI 法含水率モニタリングシステム

a) RI 水分計の概要

当別ダム CSG 製造設備に設置した RI 水分計は、コンクリート骨材の表面水量の測定用に開発された測定器である。RI 水分計の概要図を図-8.21 に示す。RI 水分計は、 ^{252}Cf (カリホルニウム 252) 密封中性子線源が装着された水分計線源部および ^3He 比例計数管が内蔵された水分計検出部、 ^{60}Co (コバルト 60) 密封ガンマ線源が装着された密度計線源部および GM 計数管が内蔵された密度計検出部、検出部への電源供給および信号処理を行うスケーラ、測定結果の表示・記録用のパソコンで構成される。

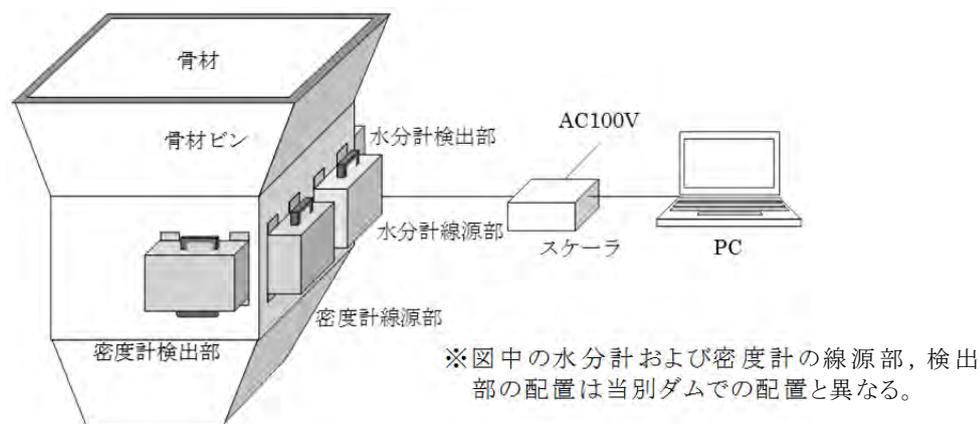


図-8.21 RI 水分計の概要

b) 測定原理

RI 水分計の測定原理の模式図を図-8.22 に示す。

①水分量測定

水分計線源部の ^{252}Cf (カリホルニウム 252) からエネルギーが大きい速中性子が放出されており、速中性子が物質中の原子核と衝突すると、次第にその運動エネルギーを失い、エネルギーの低い熱中性子に変換される。速中性子を熱中性子に変換させる能力を減速能といい、水素原子の減速能が他の原子と比較して非常に大きい。

測定試料中の水素原子はそのほとんどが水を構成する元素として存在することから、試料を透過する際の速中性子を計数することで、水分量が測定できる。

②測定される水分量

水分計で測定される水分量は、試料に含まれる全ての水分量(吸水量、結晶水、化合物、有機物)であり、これらには 100°C で気化しない水が含まれている。このため、試料の含水量を算出するには、試料の湿潤密度を測定して含水量を補正する必要がある。

③湿潤密度測定

密度計線源部の ^{60}Co (コバルト 60) からガンマ線が放出されており、ガンマ線が物質

中を通過する際に、自らのエネルギーの一部を軌道電子に与えて進行方向を変える(コンプトン効果)。測定試料の湿潤密度が大きいほどコンプトン効果によってガンマ線のエネルギーが減少するため、試料を通過する際のガンマ線を計数することで湿潤密度が測定できる。

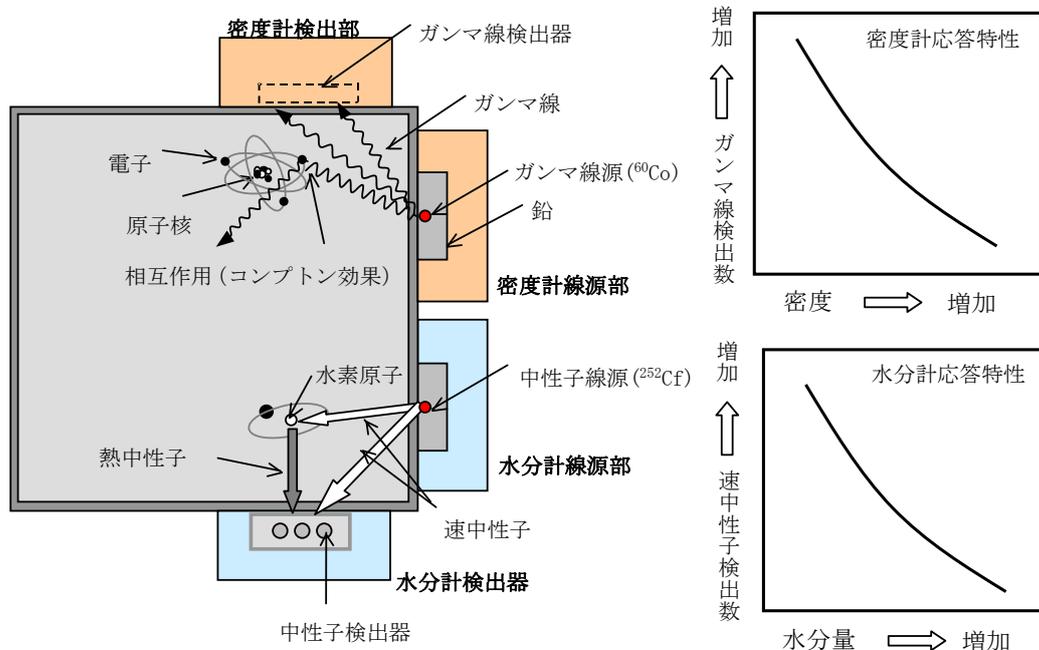


図-8.22 RI水分計の測定原理の模式図

c) 含水率および表面水量測定フロー

RI水分計による含水率測定フローを図-8.23に示す。含水率は含水量 ρm と密度計で測定する湿潤密度 ρt を使って求めている。

含水量 ρm は、速中中性子を使って試料の等価含水量 $\hat{\rho} m$ を測定し、これをガンマ線で測定した試料の湿潤密度 ρt を使って補正して求めている。また、含水率 w は含水量 ρm と湿潤密度 ρt から求めている。

表面水量は、含水率 w から試料に含まれる全水量(100°Cで気化する水量)を求め、試料の粒度と粒子の吸水率から求める吸水量を差し引いて求める。含水率からの表面水量の算出フローを図-8.24に示す。

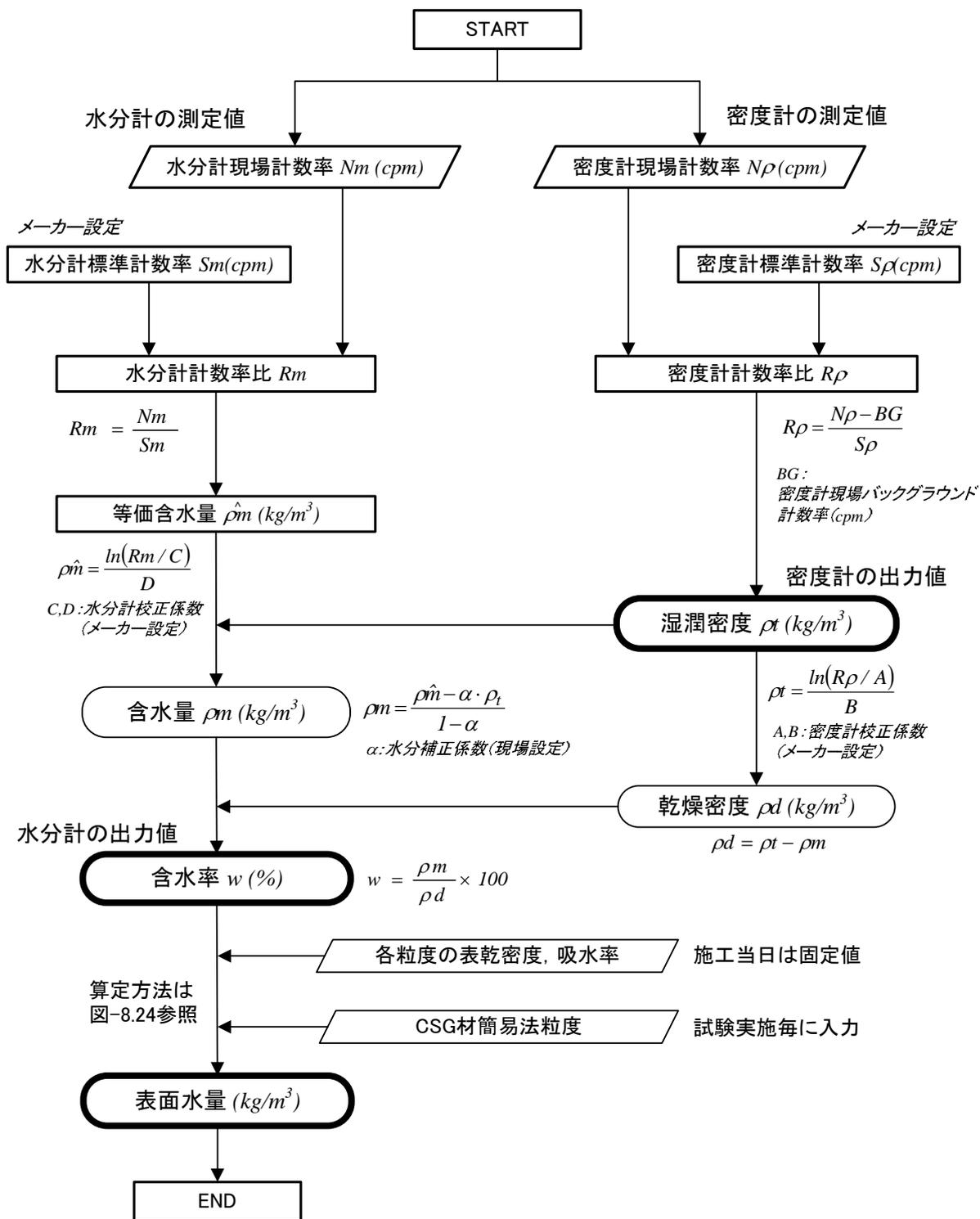


図-8.23 RI水分計による含水率測定フロー

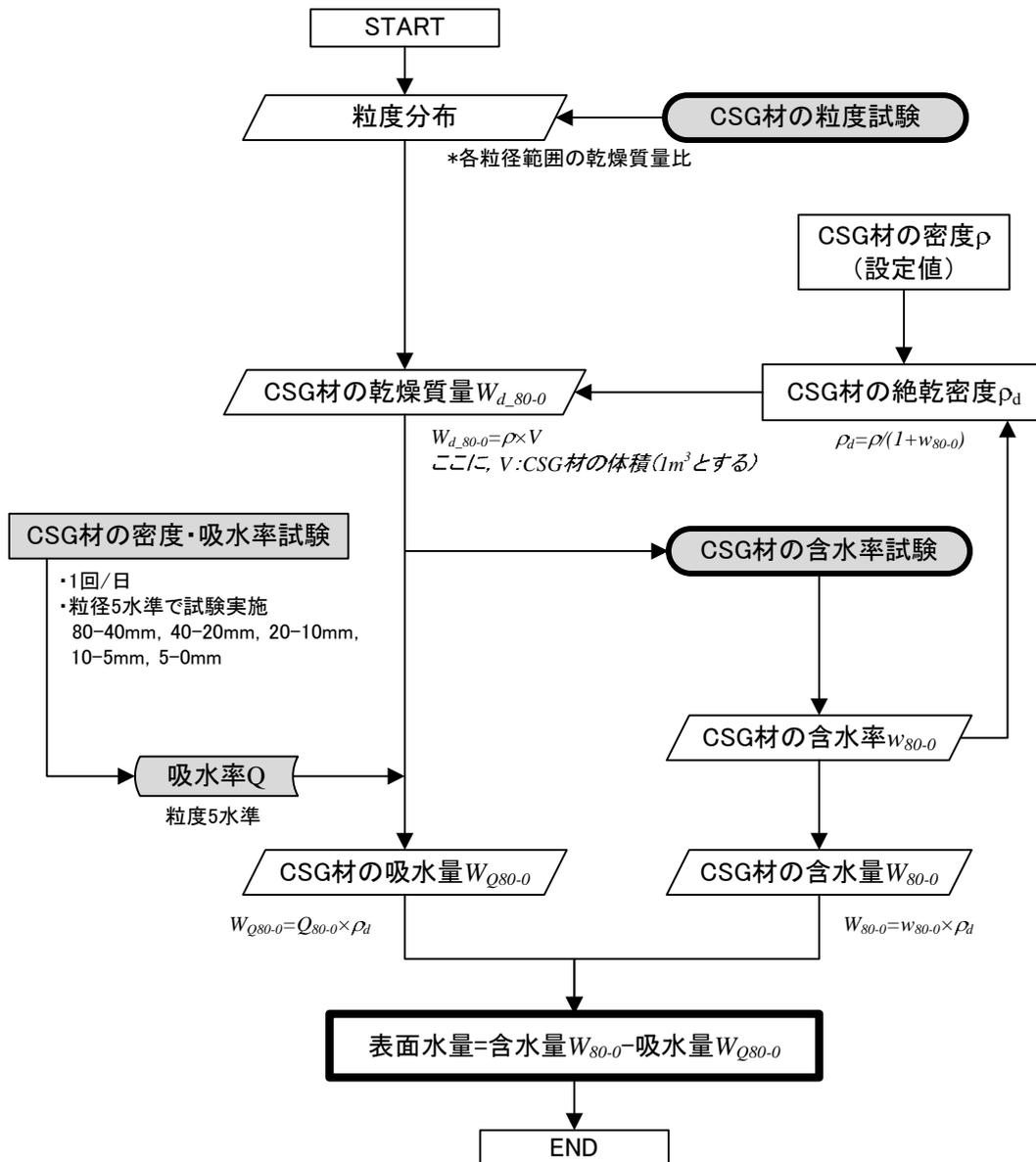


図-8.24 CSG 材表面水量算出フロー

d) CSG 材の表面水量変動監視結果

RI 水分計による表面水量変動監視例を図-8.25 に示す。図-8.25 に示すように、RI 水分計でリアルタイムに測定、算定した表面水量は、水洗い簡易法で求めた CSG 材の表面水量の変動傾向とほぼ一致しており、RI 水分計で CSG 材の表面水量の変動傾向を捉えることができている。CSG 製造設備制御室での表面水量変動監視状況を写真-8.10 に示す。

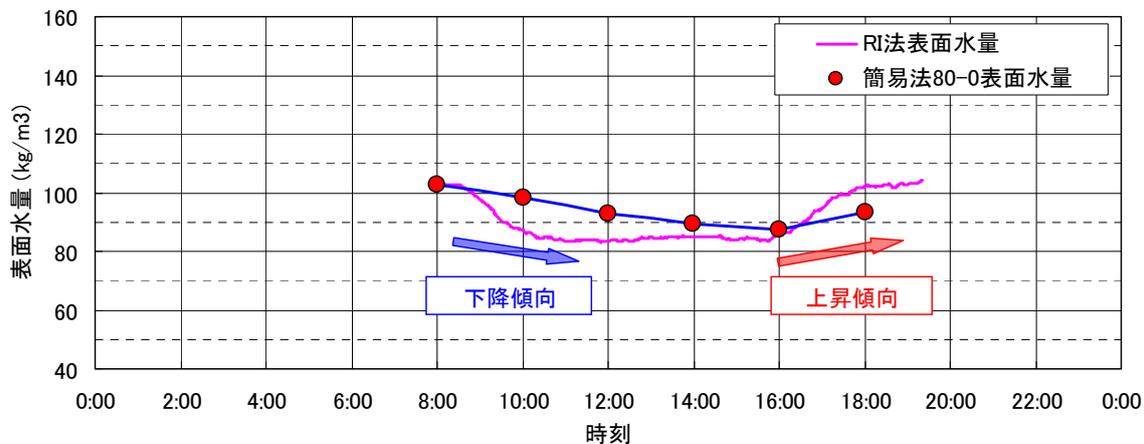


図-8.25 RI水分計による表面水量変動監視結果例(当別ダム CSG材)

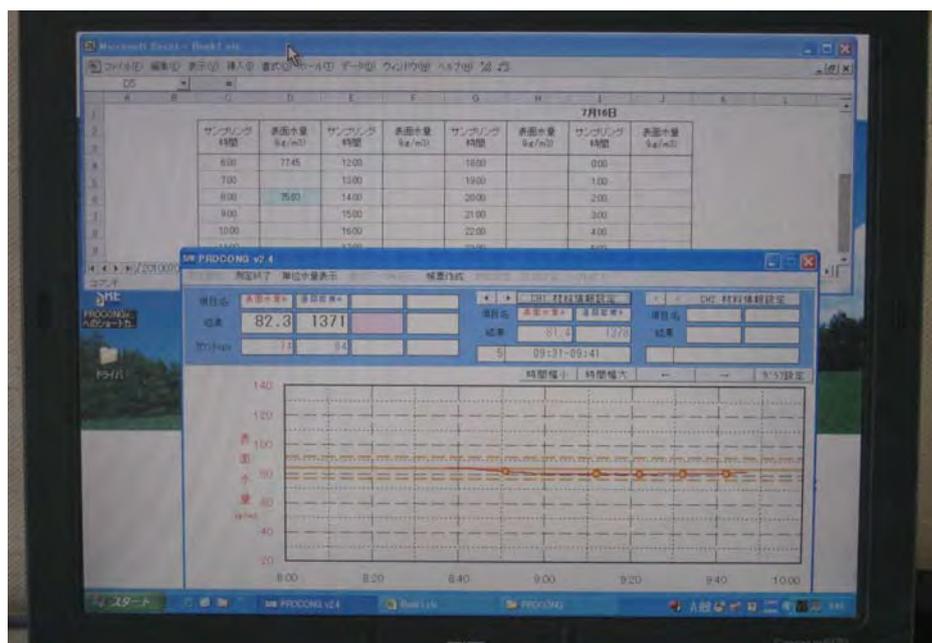


写真-8.10 RI水分計による表面水量変動監視状況(当別ダム)

(2) リアルタイム品質変動監視を併用した CSG 材品質管理フロー

両システムの導入前は、CSG 材の品質(粒度または表面水量)変動の有無に関わらず粒度と含水率の簡易法試験を1回/2時間(施工初期は1回/1時間)の頻度で行っていた。これに対して両システム導入後は、**図-8.26** に示すリアルタイム品質変動監視を併用した新しい CSG 材品質管理フローを構築し、これに従って品質管理を行った。

新しい品質管理フローは、CSG 材の品質が安定している状態では簡易法試験頻度を1回/4時間とし、CSG 材の品質変動を検知した場合はこれを1回/2時間に切り替えるものである。品質管理試験(簡易法試験)の頻度を**表-8.2**にまとめて示す。

この新しいフローに従って品質管理を行った結果、**表-8.2**に示すように CSG 材の品質が安定している場合は、品質管理試験頻度を低減することが可能となる。当別ダムでは CSG 材の品質変動が少なかったこともあり、品質管理試験(簡易法試験)の回数を変動監視技術導入前に比べて約40%低減することができた。

なお、両システムは CSG 材の品質変動監視を目的としたものであり、CSG 製造時の給水量などは簡易法試験結果に基づいて設定した。

両システムのようなリアルタイム品質変動監視技術を導入した効果は、単なる管理試験頻度の低減ではなく、CSG 材の品質変動の有無を考慮した新しい品質管理が実現できたことと考えている。また、従来の定時または定量間隔で行う品質管理に比べて、CSG 材の急激な品質変動を捉えることも可能となり、CSG の品質確保に資することができたと考えている。

表-8.2 品質管理試験(簡易法試験)の頻度

	品質変動の有無	試験頻度	試験項目
導入前	—	1回/2時間	CSG材: ・簡易粒度試験 ・簡易含水率試験(フライパン法) *)表乾密度・吸水率は、1回/日で測定
変動監視技術導入後	なし	1回/4時間	
	あり	1回/2時間	

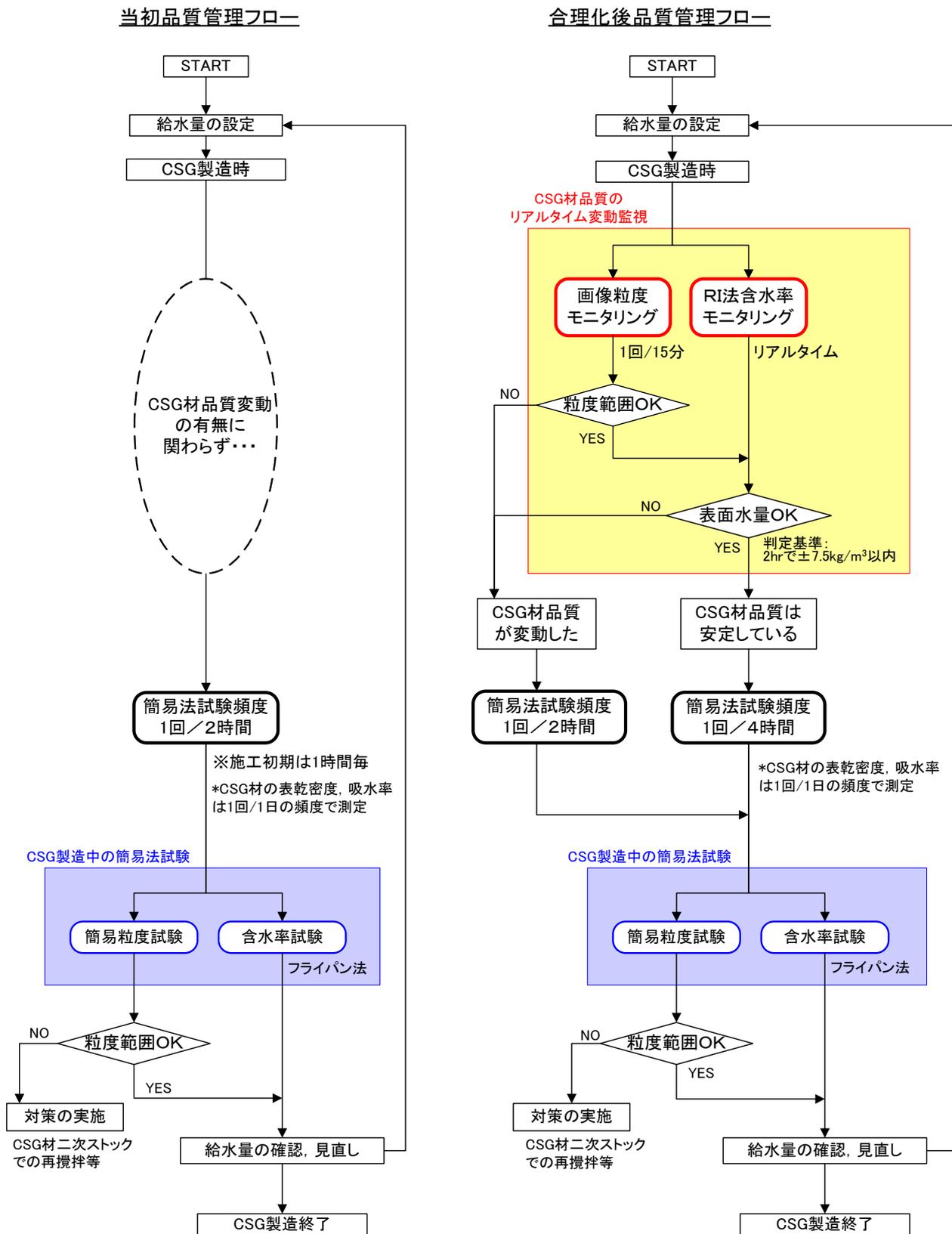


図-8.26 合理化した CSG 材品質管理フロー

8.3.4 当別ダムでの取り組みのまとめ

当別ダムは、我が国初の本格的台形CSGダムであり、CSGの施工は2009年(平成21年)5月に開始し、2010年(平成22年)9月に完了した。その後の周辺整備と試験湛水を経て、2012年(平成24年)10月に竣工している。

当別ダムでのCSGの施工および品質管理に関わる取り組みの実績と成果は「台形CSGダム設計・施工・品質管理技術資料」((財)ダム技術センター, 2012.6.)⁸⁻²⁾に反映されている。これらの貴重かつ数々の知見は、今後の我が国のダム事業のみならず、ダム技術の海外進出にも役立つものとする。

完成した当別ダムを写真-8.11～写真-8.12に示す。



写真-8.11 完成した当別ダム(2012年)



写真-8.12 ダム右岸側に据えられた記念碑(2013年著者撮影)

8.4 ロック材粒度管理への画像粒度モニタリングシステムの適用

ロックフィルダム工事では、ダム堤体の透水係数やせん断強さなどを確保するための品質管理試験の一つとして、使用するコア材、フィルタ材、ロック材を対象に粒度試験を行う(6.2.2参照)。また、近年ではレベル2地震動に対するダム堤体の安全性確保の観点から、地震によるダム堤体の変形(沈下)量が小さいことが重視されており、これを実現するためには使用するロック材の粒度および締固めが重要であるとされている⁸⁻¹⁾。

しかし、使用するロック材の最大粒径は500mm~1m程度であるため、ロック材の粒度試験は1回の試験に要する量が1tを超えることが多く、頻繁に試験を実施することは難しい。そこで、**画像粒度モニタリング**[®]システムをロック材に適用できれば、ロックフィルダムの品質管理の高度化ならびに合理化に資することができると考え、ロック材への本システムの適用性を検討、確認した。そして、本システムを殿ダム(2章(6)参照)建設工事の品質管理に試行的に導入した。

本節では、本システムのロック材への適用性検討結果、殿ダム建設工事での試行結果について論ずる。

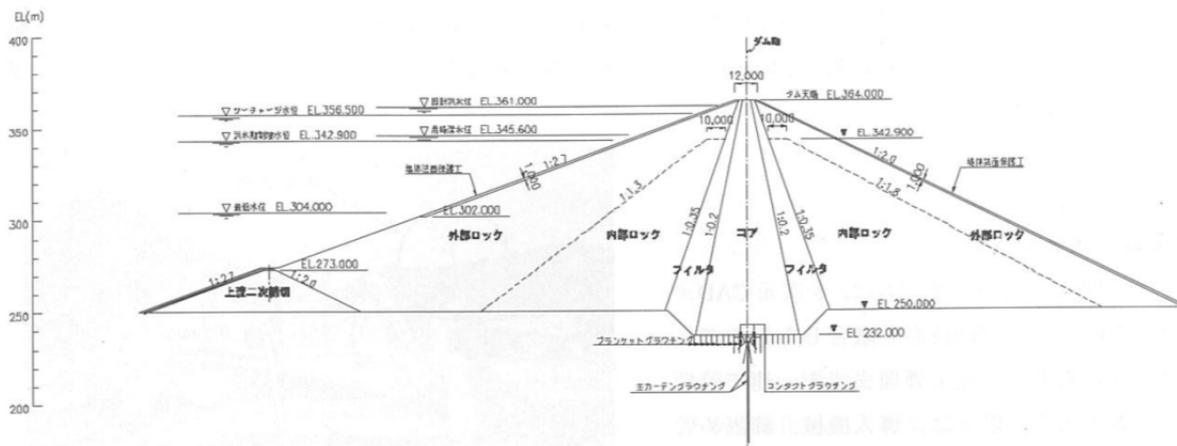
8.4.1 胆沢ダムにおけるロック材への適用性検討

ロック材への適用性は、胆沢ダム(2章(5)参照)の最大粒径1mのロック材11試料を対象に検討した。

(1) 胆沢ダムロック材

胆沢ダムのロック材を写真-8.13に示す。胆沢ダムのロック材は最大粒径1mであり、表-7.10(2)に示したような品質管理試験を実施している。このうち粒度については、内部ロック材および外部ロック材(図-2.5参照)ともに、1回/5万 m^3 の頻度で試験を実施することが定められている。胆沢ダムでの施工実績(6.2.3(3)参照)によると、ロック材は月平均19万 m^3 (昼夜施工、ロックゾーン総量829万 m^3)で盛り立てている⁸⁻¹⁾。月当たりの施工日数を20日間とすると、日平均の盛立量は9,500 m^3 となる。つまり、施工日5日程度に1回の頻度でロック材の粒度試験が必要になる。なお、この数字は平均盛立量に基づくものであり、盛立最盛期ではほぼ毎日粒度試験を実施する必要がある。

最大粒径1mのロック材の粒度試験に供する試料量は3~4t/回であり、試験には小型建設機械1台と土質試験員3~4名が従事して8時間以上を要する。



(再掲)図-2.5 胆沢ダム標準断面図 2-12)

(再掲)表-6.10(2) 胆沢ダムロック材の品質管理基準

材料	管理項目	試験方法	規格値	試験頻度	場所	備考		
透水性材料 (ロック材 料)	内部	密度・吸水率	JIS A 1202 JIS A 1110	絶乾比重 $G_b \geq 2.33 \text{g/cm}^3$	1回/50,000m ³	盛立面	比重・吸水率試験: 4水準(200-63-37.5-4.75mm) 密度試験孔掘削土を対象に実施する	
		粒度	ふるい分け	-0.850mm				20%以下
				-9.5mm				30%以下
				最大粒径	1m			
		現場密度	JGS 1612 水置換法	$\rho_d \geq 1.86 \text{t/m}^3$	1回/50,000m ³			
	現場透水	変水位法	$k \geq 1 \times 10^{-3} \text{cm/s}$					
	三軸圧縮試験	JGS 0524 $\phi 300, \text{CD}$	$(d < 63 \text{mm}) \phi \geq 38.5^\circ$	1回/500,000m ³	室内	室内構成供試体		
	外部	密度・吸水率	JIS A 1202 JIS A 1110	絶乾比重 $G_b \geq 2.37 \text{g/cm}^3$	1回/50,000m ³	盛立面	比重・吸水率試験: 4水準(200-63-37.5-4.75mm) 密度試験孔掘削土を対象に実施する	
		粒度	ふるい分け	-0.850mm				20%以下
				-9.5mm				30%以下
最大粒径				1m				
現場密度		JGS 1612 水置換法	$\rho_d \geq 1.92 \text{t/m}^3$	1回/50,000m ³				
現場透水	変水位法	$k \geq 1 \times 10^{-2} \text{cm/s}$						
三軸圧縮試験	JGS 0524 $\phi 300, \text{CD}$	$(d < 63 \text{mm}) \phi \geq 41.5^\circ$	1回/500,000m ³	室内	室内構成供試体			



写真-8.13 胆沢ダムロック材

(2) 検討方法

1回のロック材の撮影試料量は、既述した粒度試験と同様になるように、3～4t程度とした。これを5m×5mに平坦に敷き均し、敷均し状況を変化させながら3回ずつ撮影した。粒度インデックス I_i とロック材の加積通過率の関係を近似した相関式は、CSG材の場合と同様なキャリブレーション試験を行って設定した。キャリブレーション試験では、図-8.27に示す胆沢ダムロック材の実績粒度に基づいて設定した最粗粒材料および最細粒材料、標準的粒度材料の3材料を対象にした。なお、キャリブレーション試験には5日（ロック材粒度調整3日、撮影1日、画像解析1日）を要した。

撮影場所は胆沢ダム下流モータープール内であり、既述したCSG材の場合と同様に、写真-8.14に示すシートで直射日光などの影響を低減した。画像は写真-8.15に示すように高所作業車を使用して高さ7mから撮影した。

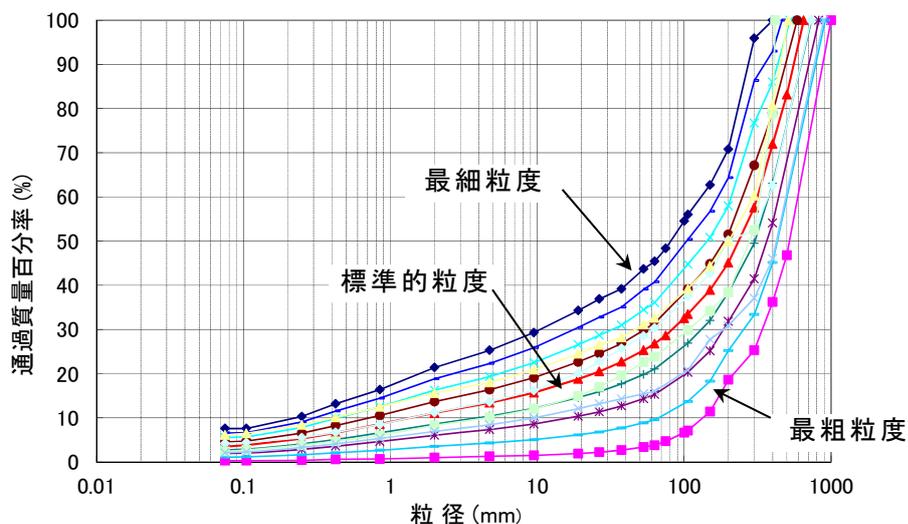


図-8.27 胆沢ダムロック材の粒径加積曲線（胆沢ダム実績粒度）



写真-8.14 画像撮影場所(胆沢ダム下流側モータープール)

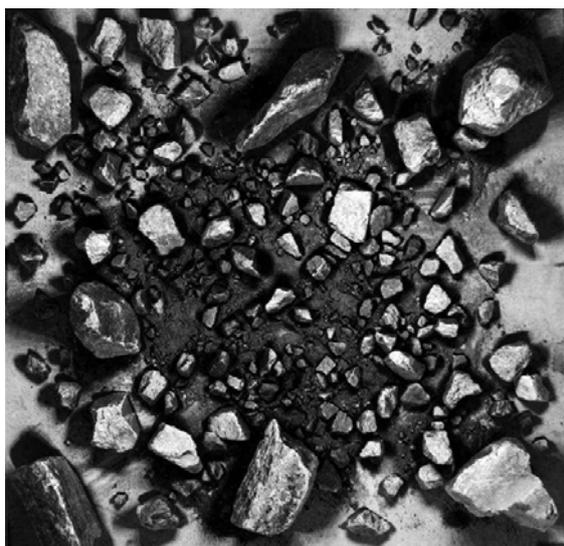


写真-8.15 胆沢ダムにおける画像の撮影状況

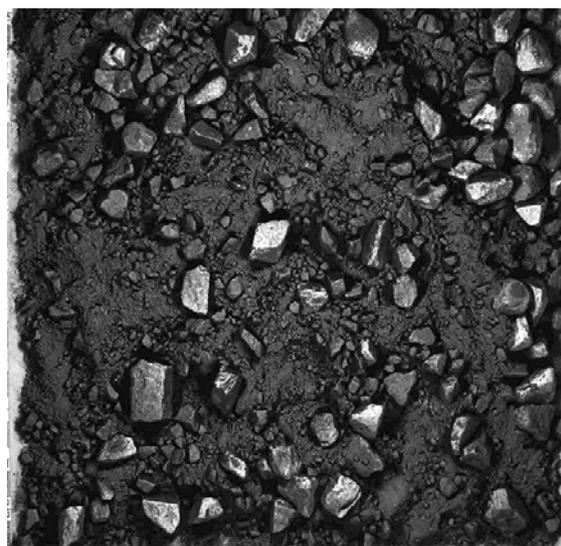
(3) 撮影画像例

キャリブレーション試験で撮影した最粗粒材料および最細粒材料，標準的粒度材料（粒径加積曲線は図-8.27 参照）の撮影画像を写真-8.16 に示す。

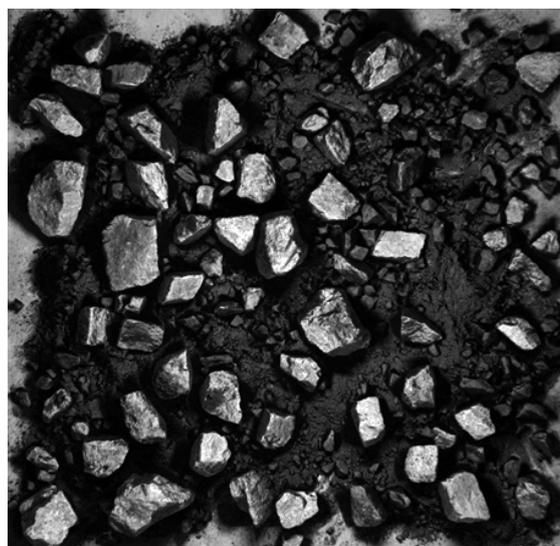
キャリブレーション試験着手時に敷均し範囲を変えて画像を撮影し，最終的には敷均しを $5\text{m} \times 5\text{m}$ の範囲とし，面密度（8.1.4(2)参照）は $120 \sim 160\text{kg/m}^2$ （総質量 $3 \sim 4\text{t}$ ）に設定した。なお，ロック材料の敷均しには小型油圧ショベル（ 0.2m^3 級）を用いた。



(a) 最粗粒材料



(b) 最細粒材料



(c) 標準的粒度材料

写真-8.16 胆沢ダムロック材の撮影画像

(4) ロック材の粒度インデックスと加積通過率の関係

キャリブレーション試験で得たロック材の粒度インデックス I_i と加積通過率の関係を図-8.28 に示す。監視粒径は 300mm, 150mm, 75mm とした。画像解析の分解能は CSG 材の場合 (8.1.8 参照) と同様に最大粒径の 3% 程度 (胆沢ダムロック材の場合, 最大粒径 1m なので 30mm) であるが, 実際に撮影した画像を対象に識別粒径を変化させた画像解析を行い, 安定して粒子が識別でき, かつ加積通過率との相関が比較的明確な粒径を模索した。その結果, 粒径 75mm (最大粒径の 7.5%) であれば粒子識別が良好だったため, 最小監視粒径を 75mm に設定した。

図-8.28 に示すように, CSG 材の場合 (図-8.6 参照) と同様に, 両者の関係は良好な相関関係を示した。また, 両者の関係を近似した相関式は, 監視粒径毎に設定した。

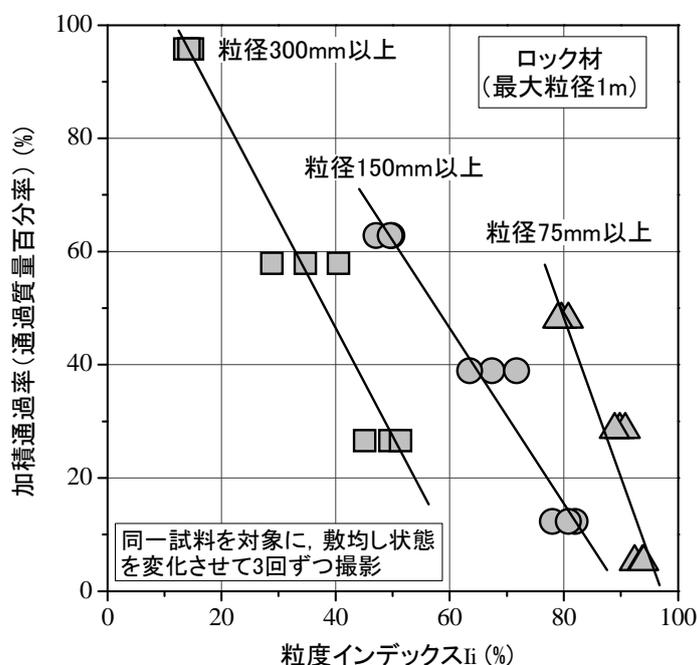


図-8.28 胆沢ダムロック材の粒度インデックスと加積通過率の関係

(5) ロック材への適用性検討結果

本システムで推定した加積通過率 (監視粒径 300mm, 150mm, 75mm) と粒度試験結果との比較を図-8.29 に, 本システムで推定した粒径加積曲線の例を図-8.30 に示す。図-8.29 によると, 本システムで推定した加積通過率の変動傾向は粒度試験結果と良く一致している。また, 図-8.30 に示すように本システムで推定した粒径加積曲線は, 実績粒度に基づいて設定した粒度範囲内にあることが確認できている。このことから, 本システムでロック材の粒度分布の変動傾向を監視でき, 粒度管理手法として十分に適用できることが検証できた。

なお、胆沢ダムではロック材の粒度試験に約 1 日を要していたが、本システムを用いて試料採取 (3~4t) から粒径加積曲線を得るまでに要する時間は 3 時間程度であった。このことから、CSG 材の場合と同様に、粒径加積曲線が迅速に得られることがわかる。

以上の検討結果を基に、殿ダム(2章(6)参照)建設工事のロック材粒度管理に本システムを試行的に導入することとした。

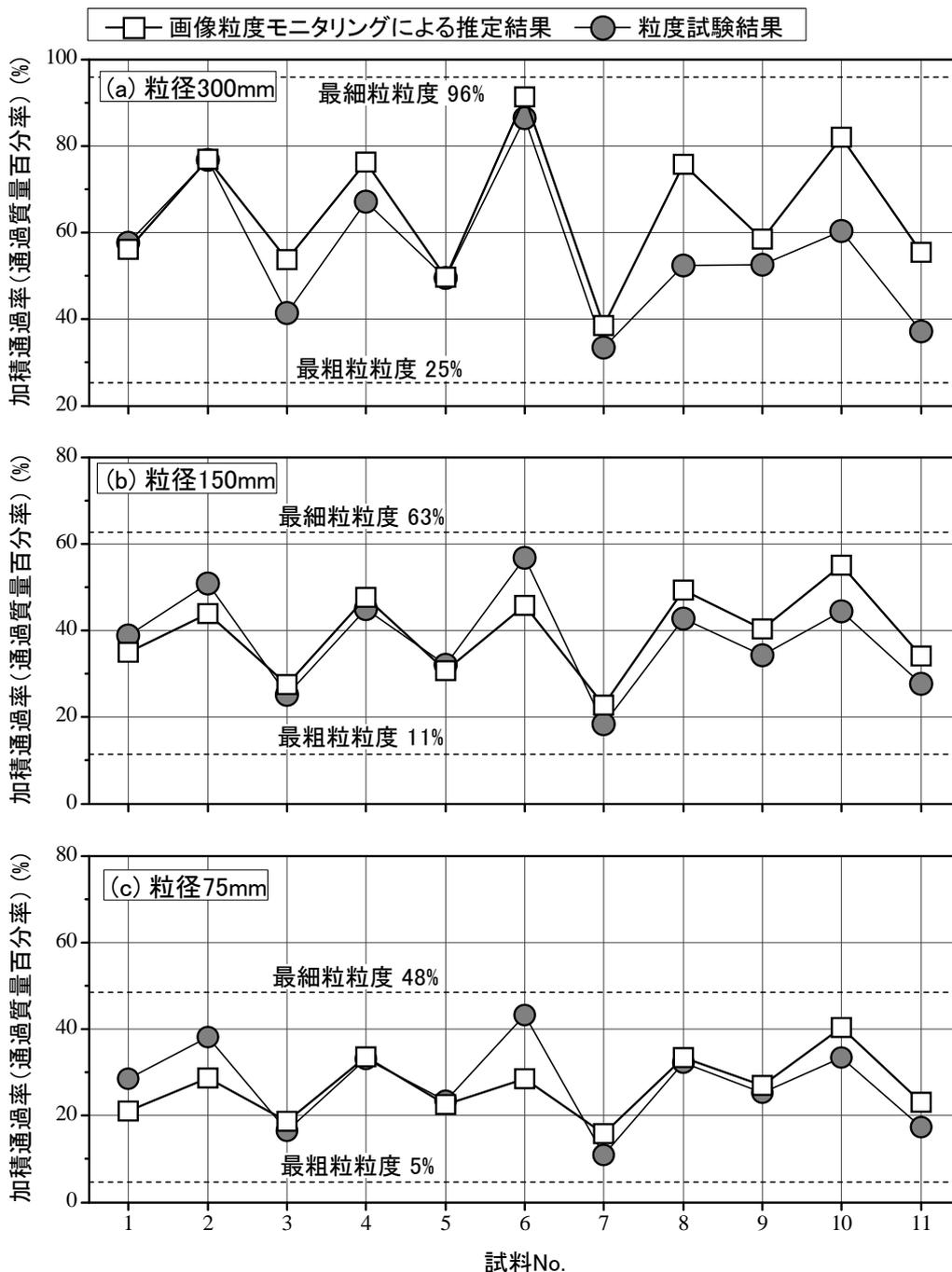


図-8.29 胆沢ダムロック材の加積通過率の比較

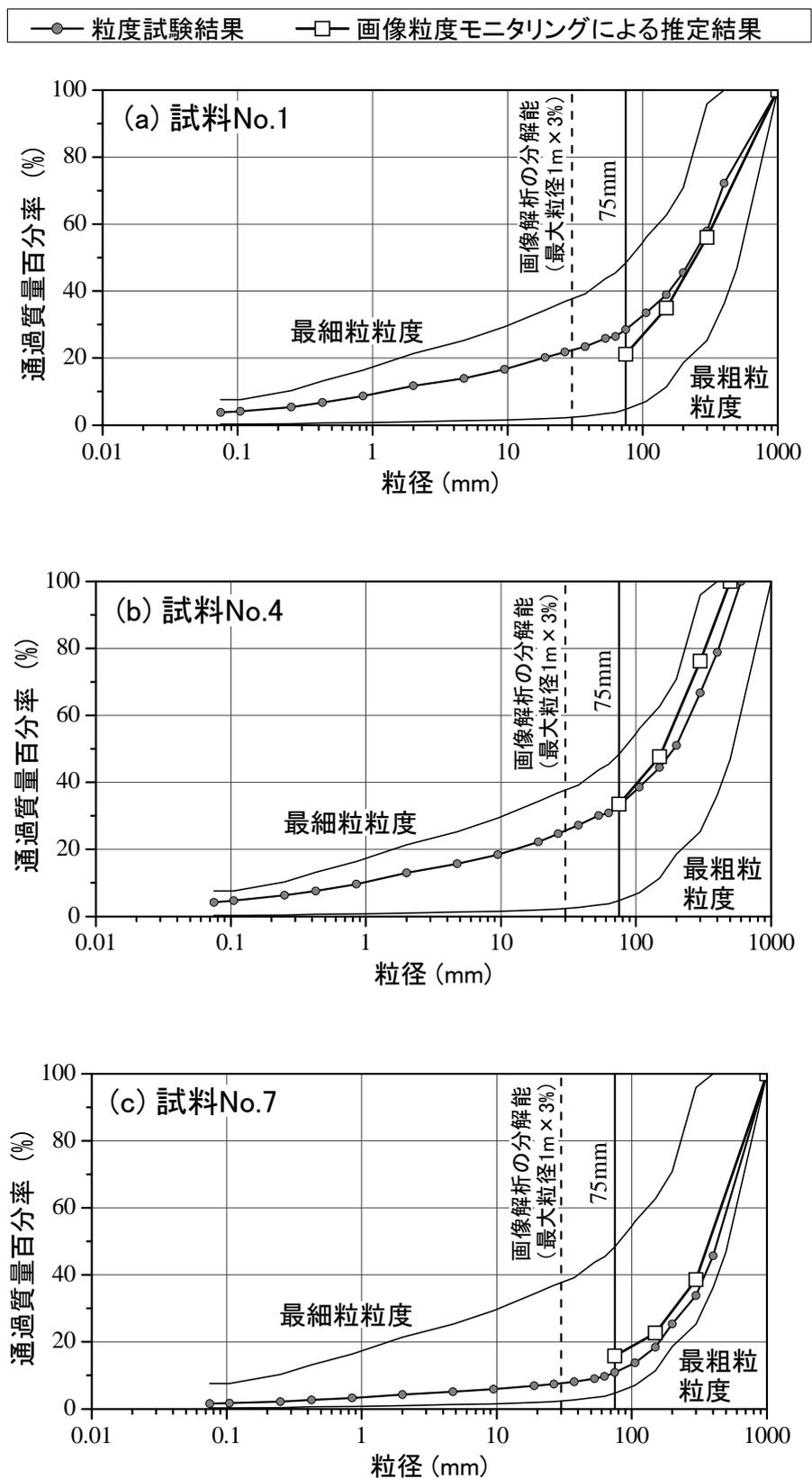


図-8.30 推定した胆沢ダムロック材の粒径加積曲線の例

8.4.2 殿ダムロック材粒度管理への試行的導入結果

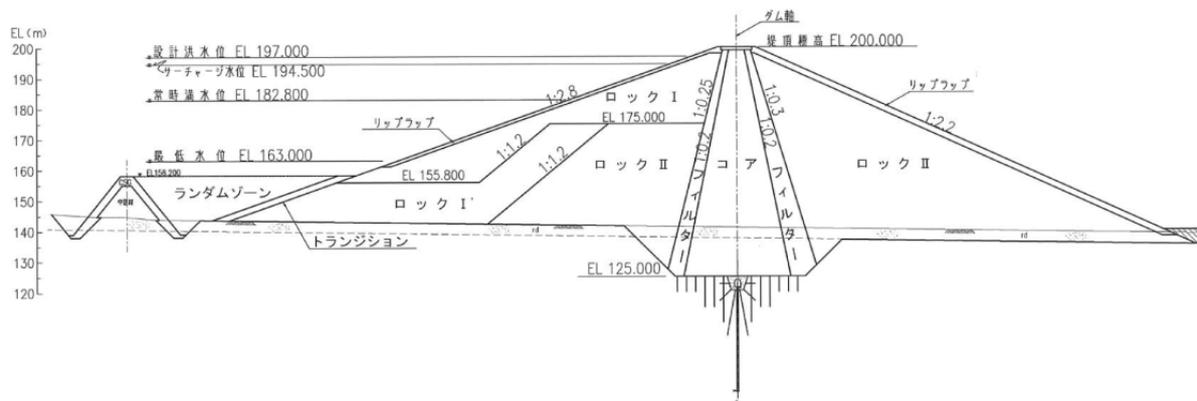
胆沢ダムにおいて、本システムがロック材の粒度管理手法として適用できることを確認したため、本システムを殿ダム建設工事のロック材粒度管理に試行的に導入した。

(1) 殿ダムロック材

殿ダムロック材(ロックⅠ材, ロックⅠ'材, ロックⅡ材, 図-2.6 参照)は最大粒径 500m であり, 表-7.11(2)に示したような品質管理試験を実施している。粒度は1回/5万 m³の頻度で試験を実施することが定められている。

殿ダムでの施工実績によると, ロック材は月平均 10 万 m³(昼間施工, 総量 158 万 m³), 16ヶ月で盛り立てている。ロック材の月当たりの施工日数を20日間とすると, 日平均の盛立量は 5,000m³になる。つまり, 施工日 10 日程度に1回の頻度でロック材の粒度試験が必要になる。なお, この数字は平均に基づくものであり, 盛立最盛期では 30 万 m³/月が記録されていることから, 1回/3~4 日の頻度で実施する必要がある。

なお, 最大粒径 500m のロック材の粒度試験に供する試料量は 2t 程度/回であり, 試験に小型建設機械 1 台と試験員 2 名が従事して 8 時間を要する。



(再掲)図-2.6 殿ダム標準断面図²⁻¹²⁾

(再掲)表-7.11(2) 殿ダムロック材の品質管理基準

材料	管理項目	試験方法	規格値	試験頻度	場所	備考
透水性材料 (ロック材料)	密度・吸水率	JIS A 1202 JIS A 1110	I 材 $G_b \geq 2.5g/cm^3$ $Q \leq 5.0\%$	1回/50,000m ³	盛立面	比重・吸水率試験: 4水準 (9.5~53mm, +53mm)
			I' 材 $G_b \geq 2.4g/cm^3$ $Q \leq 5.0\%$			
			II 材 $G_b \geq 2.3g/cm^3$ $Q \leq 5.0\%$			
	粒度	JIS A 1204 ふるい分け	最大粒径 500mm			3点/回
	現場密度	JGS 1612 水置換法 $\phi 1.5m$	I 材 $\rho_d \geq 2.2g/cm^3$			
			I' 材 $\rho_d \geq 2.1g/cm^3$			
			II 材 $\rho_d \geq 2.0g/cm^3$			
現場透水	変水位法	$k \geq 1 \times 10^{-2} cm/s$	密度試験孔を利用して測定			
三軸圧縮試験	JGS 0524 $\phi 300, CD$ ($d < 53mm$)	I 材 $\phi \geq 40.5^\circ$	1回/200,000m ³	室内	室内構成供試体	
		I' 材 $\phi \geq 39^\circ$				
		II 材 $\phi \geq 38^\circ$				

(2) 試行方法

殿ダムロック材の撮影状況を写真-8.17, 写真-8.18 に示す。画像は、殿ダム品質管理試験で実施している粒度試験に準じて設定した質量 2t 程度のロック材を 3.6m×2.5m(面密度 220kg/m²程度)に範囲に敷き均して、高さ 4m から撮影した。なお、胆沢ダムでの試行と同様に、写真-8.17 に示すようなシートで直射日光などの影響を低減した。また、ロック材料の敷均しには、胆沢ダムと同様に小型油圧ショベル(0.1m³級)を用いた。



写真-8.17 殿ダムでの撮影場所

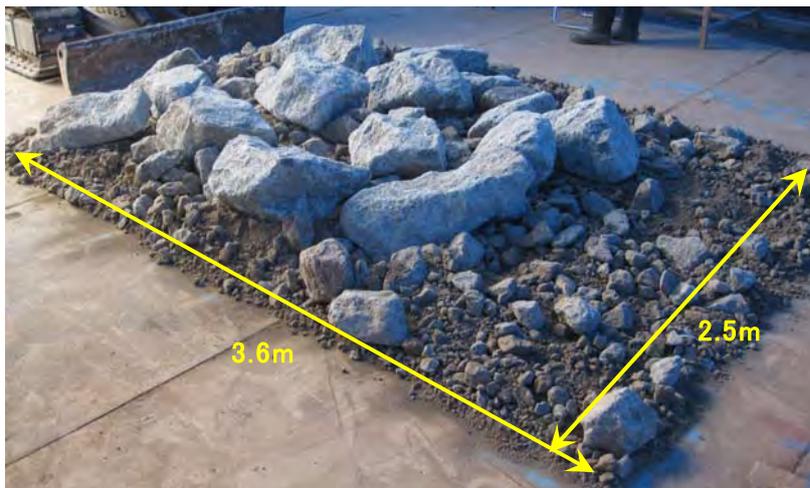


写真-8.18 殿ダムロック材の撮影状況

(3) 撮影画像と画像解析結果例

殿ダムロック材の実績粒度を図-8.31 に、ロック材の最粗粒材料ならびに最細粒材料の撮影画像と画像解析結果(監視粒径 300mm 以上の粒子を着色)の比較例を図-8.32 に示す。

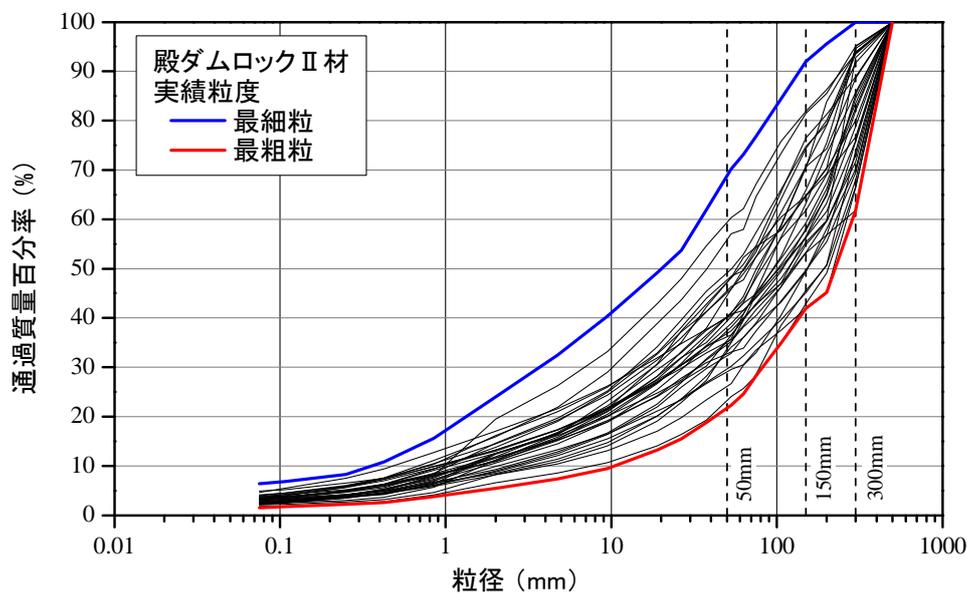


図-8.31 殿ダムロック材(Ⅱ材)の実績粒度

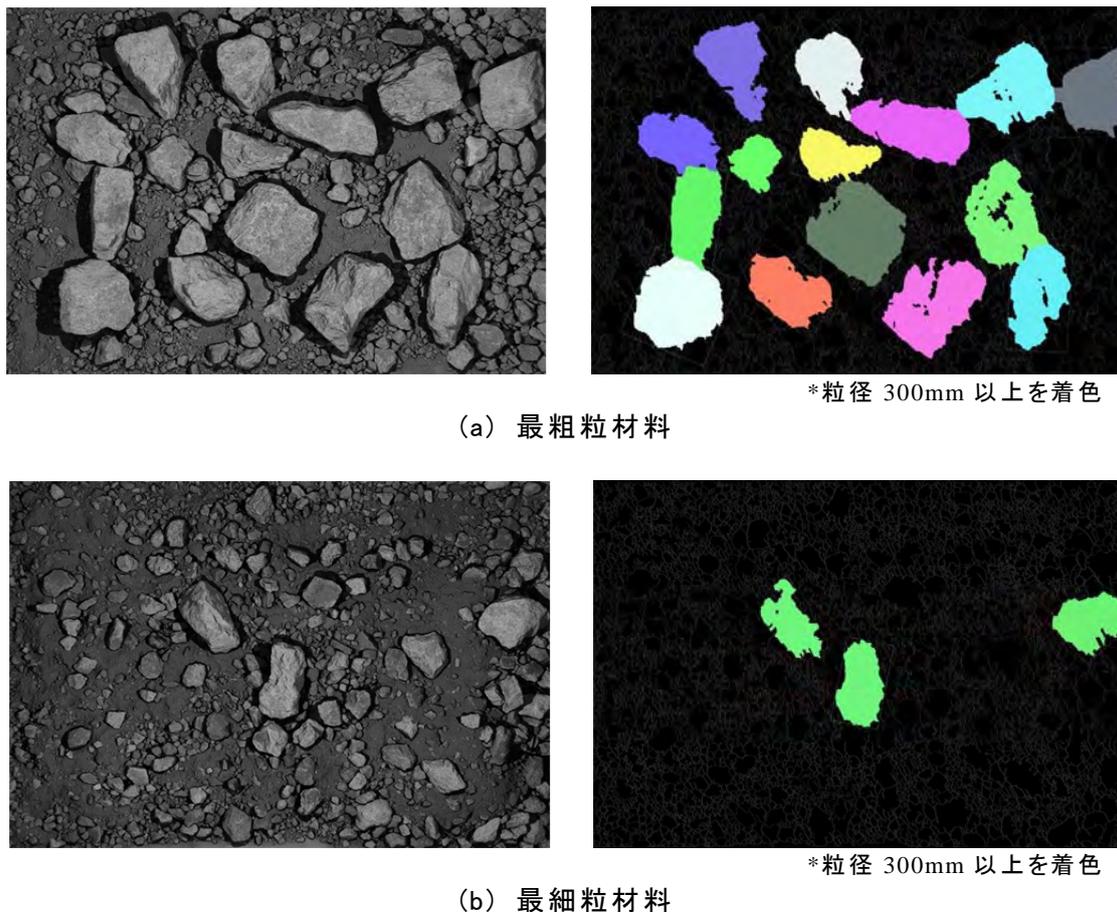


図-8.32 殿ダムロック材の撮影画像と解析画像の比較

(4) 粒度インデックスと加積通過率の関係

キャリブレーション試験で得たロック材の粒度インデックス I_i と加積通過率(通過質量百分率)の関係を図-8.33 に示す。殿ダムロック材では監視粒径を 300mm, 150mm, 50mm と設定した。最小監視粒径(50mm, 最大粒径の 10%)は CSG 材や胆沢ダムロック材と同様に、実際に撮影した画像を対象に識別粒径を変化させた画像解析を行って設定した。

また、図-8.33 に示すように、殿ダムでは全体傾向を捉えることに主眼を置き、二次曲線式を使用して粒度インデックス I_i と加積通過率(通過質量百分率)の関係を 1 本の近似線で表すこととした。設定した二次曲線式を(8.6)式に示す。

なお、現状は粒度インデックス I_i と加積通過率(通過質量百分率)の関係に応じて近似方法を選択しているが、今後の継続的なデータ収集を通じて最適な近似方法を検討したいと考えている。

$$y = a + bx + cx^2 \tag{8.6}$$

ここに, a, b, c : 定数 ($a=105.2, b=-1.271, c=0.005$)

x : 粒度インデックス値 (%)

y : 通過質量百分率 (%)

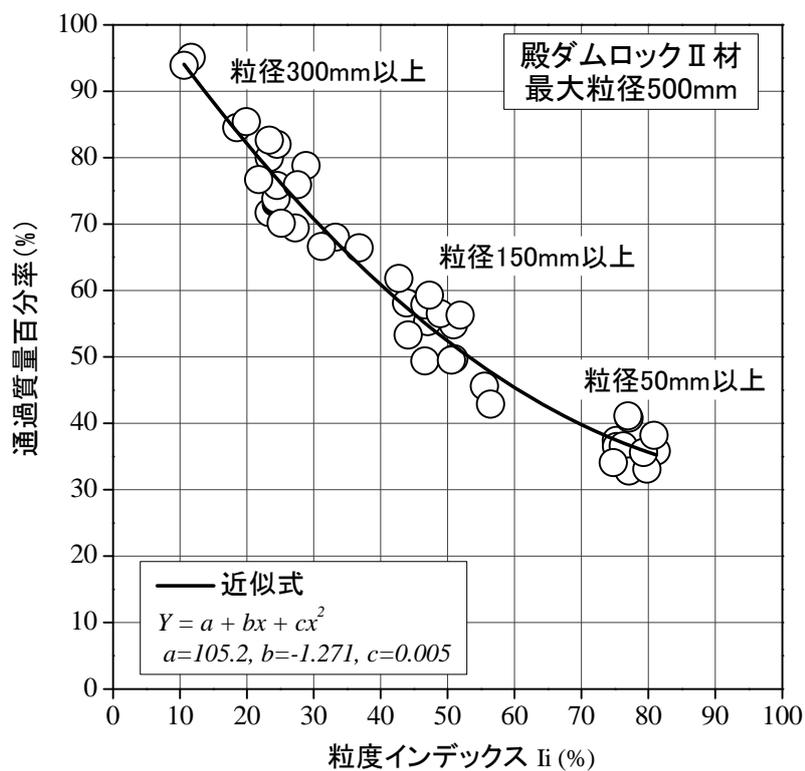
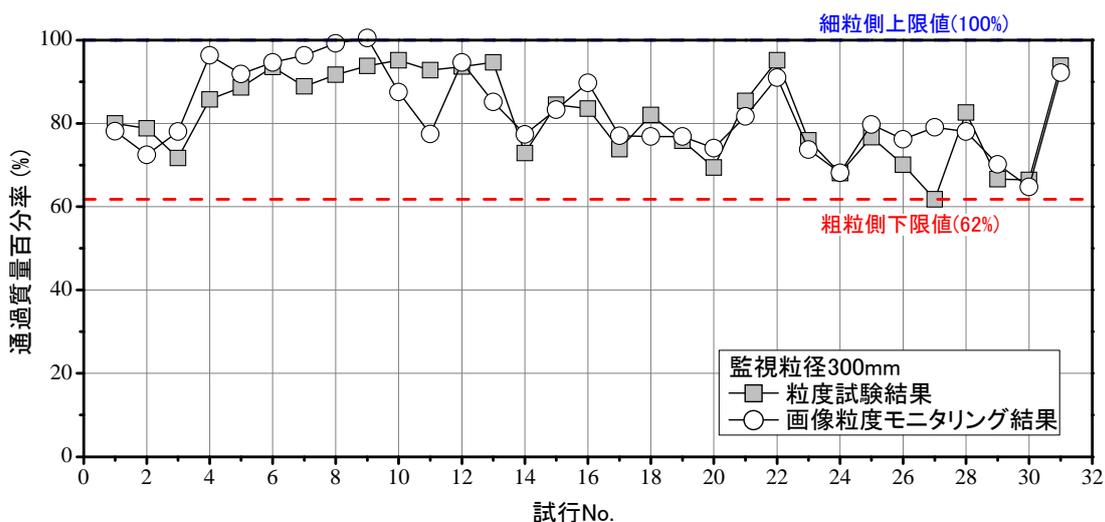


図-8.33 殿ダムロック材の粒度インデックスと加積通過率の関係

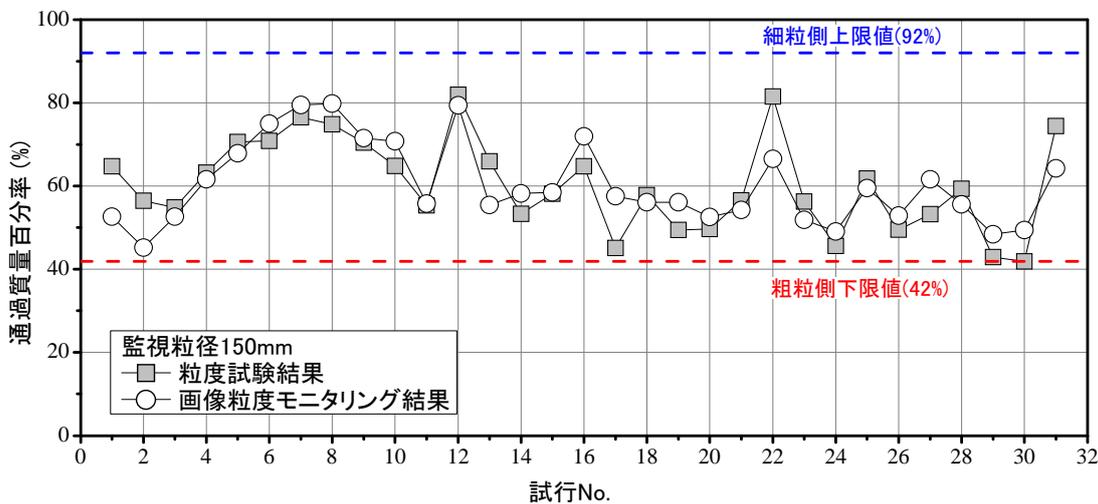
(5) 粒度変動監視結果

本システムと粒度試験で求めた監視粒径 300mm, 150mm の通過質量百分率(加積通過率)の変動監視結果を図-8.34 に示す。

図-8.34 に示すように、本システムで推定した通過質量百分率とこの変動傾向は粒度試験結果と概ね一致しており、所定の粒度範囲を満足していることが確認できている。



(a) 監視粒径 300mm



(b) 監視粒径 150mm

図-8.34 監視粒径 300mm, 150mm の通過質量百分率の変動監視結果

(6) Talbot 関数との組み合わせ

殿ダムロック材の最大粒径は 500mm であり、粒子識別精度を考慮して最小監視粒径を 50mm とした。一方、殿ダムでは粒径 50mm 未満の含有量によって透水係数が変化することが確認されており、粒径 50mm 未満の粒度分布も把握したいとの要望があった。このため、土質材料の粒径加積曲線の推定近似式としてよく使用される Talbot 関数⁸⁻⁴⁾を用いて、粒径 50mm 未満の粒径加積曲線の推定を試みた。

Talbot 関数を(8.7)式に、本システムとの組み合わせ方法を図-8.35 に示す。Talbot 指数 n は、最大粒径 D を 500mm、篩い目 d を 50mm とし、画像粒度モニタリングで推定した粒径 50mm の通過質量百分率 P_{50mm} になるように計算した。計算の結果、指数 n は 0.44~0.56 の範囲となった。

本システムと Talbot 関数を使って推定した粒径加積曲線を図-8.36 に示す。図-8.36 に示すように本システムと Talbot 関数を併用することで、ロック材のように幅広い粒度分布を持つ材料の粒径加積曲線も推定でき、粒度分布の異常の有無が判定が可能であることが確認できた。

$$P = \left(\frac{d}{D_{max}} \right)^n \times 100 \tag{8.7}$$

- ここに、 P : 通過質量百分率 (%)
- d : 対象とする粒径 (mm) (今回は 50mm と設定した)
- D_{max} : 最大粒径 (mm) (今回の検討では 500mm と設定した)
- n : Talbot 指数

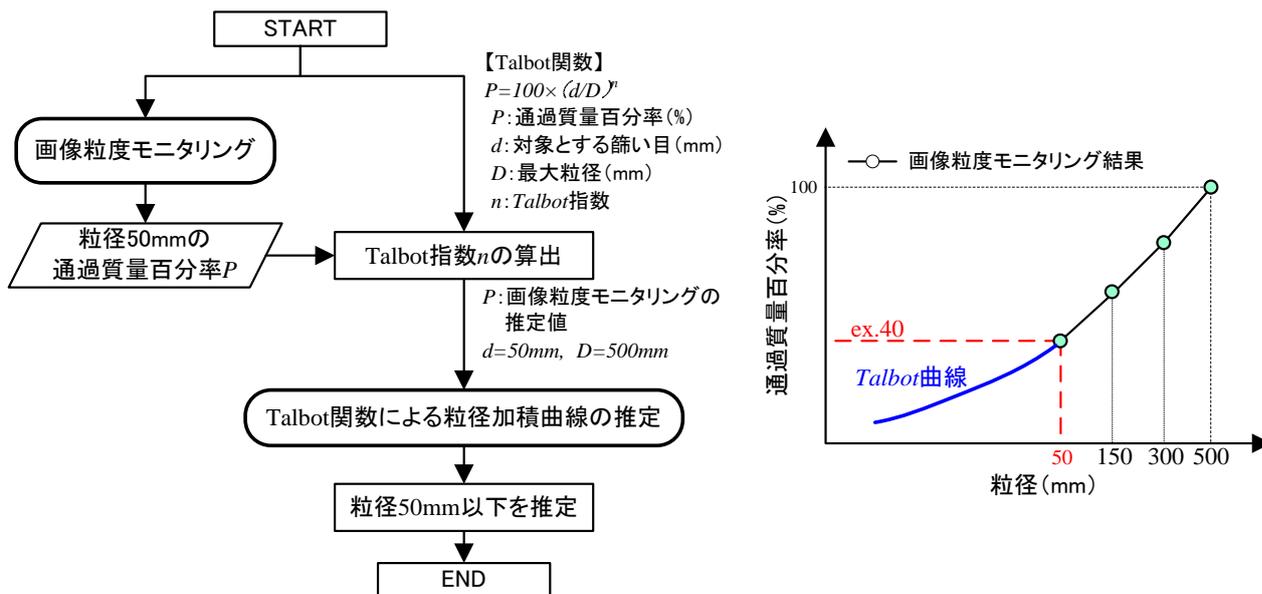


図-8.35 Talbot 関数との組み合わせ方法

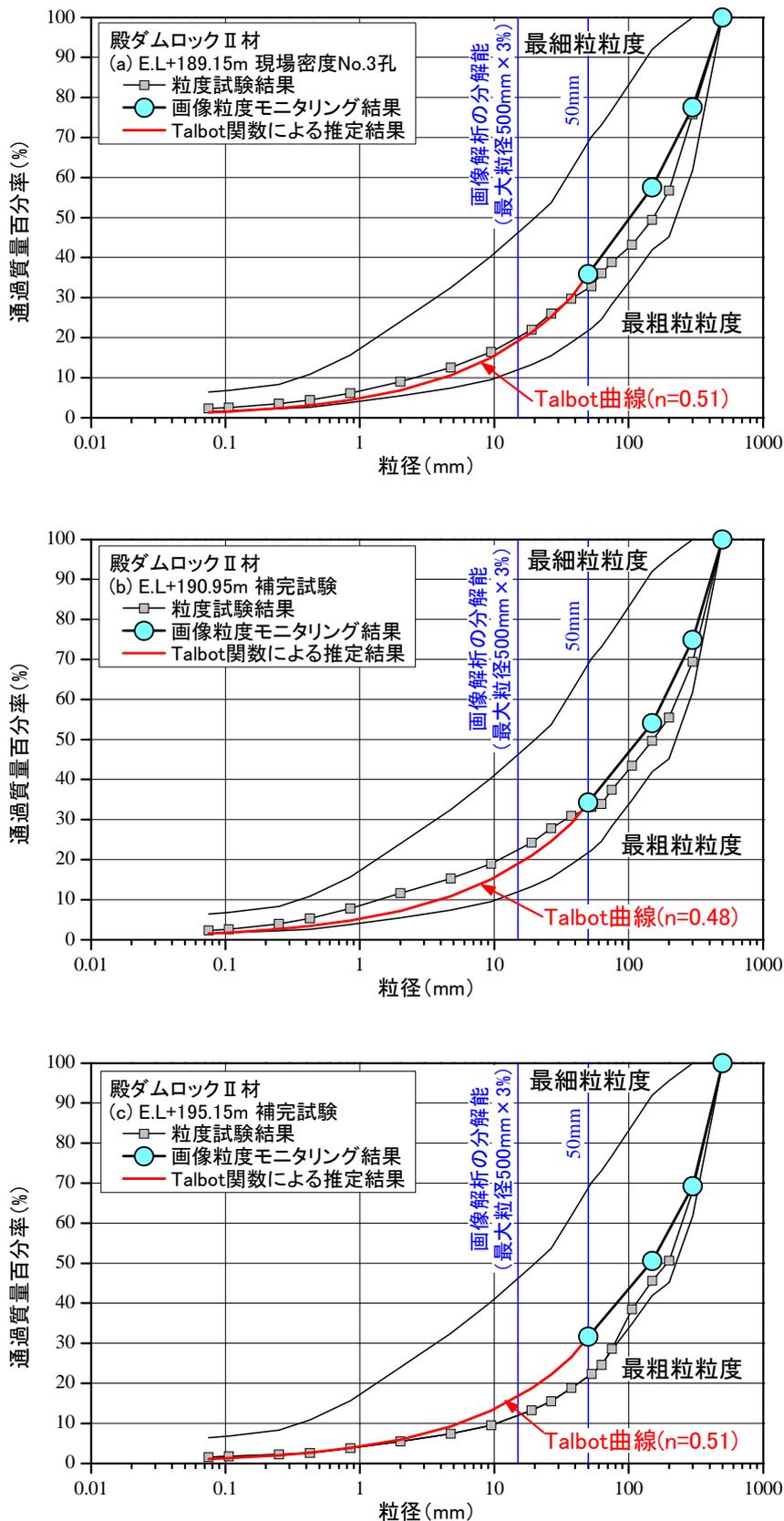


図-8.36(1) Talbot 曲線を併用した粒径加積曲線全体の推定結果例

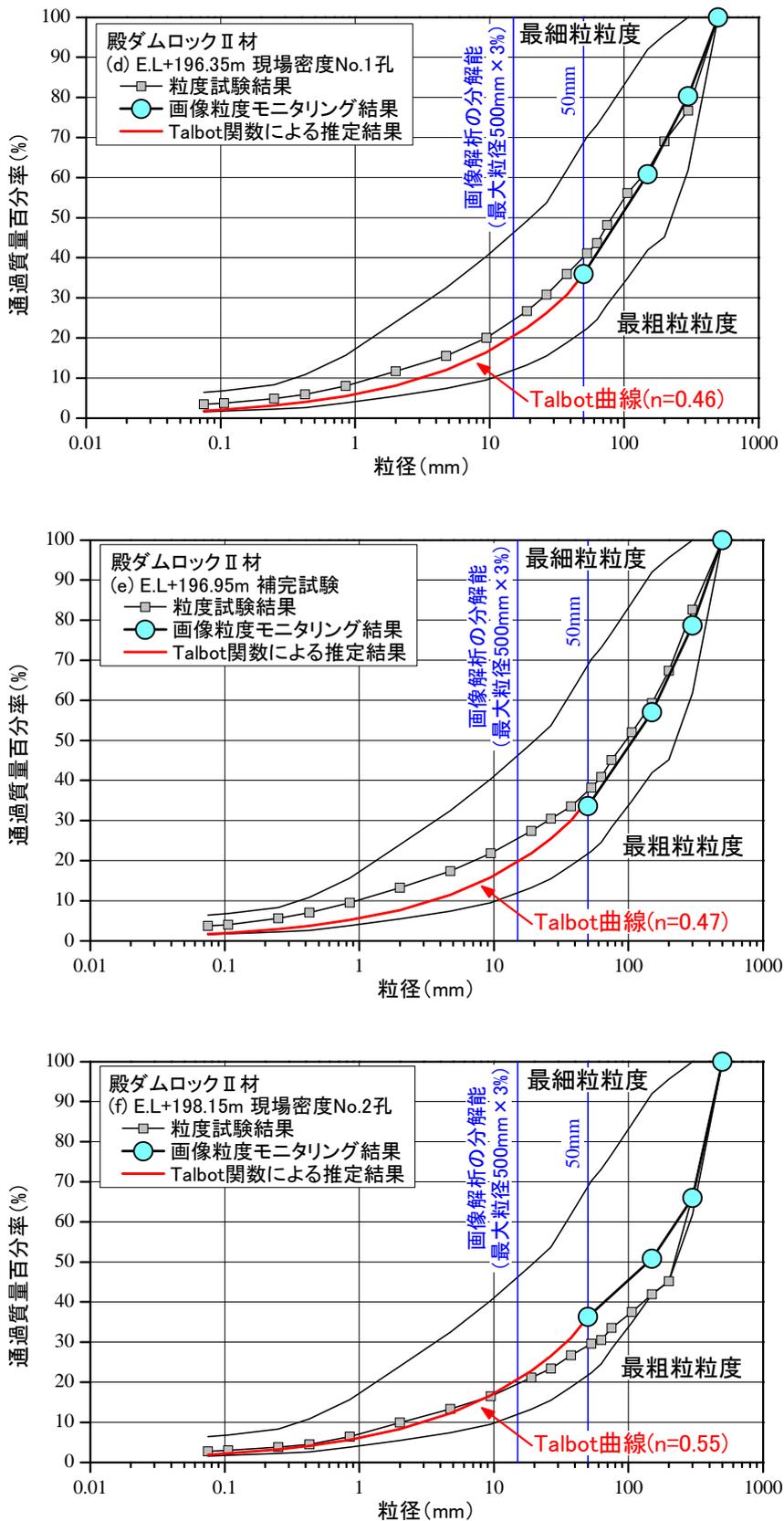


図-8.36(2) Talbot 曲線を併用した粒径加積曲線全体の推定結果例

(7) ロック材粒度試験への導入の効果

堰ダムでの品質管理におけるロック材の粒度試験は、1 試料当たり 2t 程度で実施しており、試験には土質試験員 2 名で 8 時間程度を要していた。一方、本システムを用いた場合は、土質試験員 2 名で試料採取 (2t 程度) から粒径加積曲線を得るまでに要する時間は 2 時間程度であった。

このことから、本システムを導入することでロック材粒度の変動傾向監視が可能となり、粒度試験の省力化ならびに迅速化を図ることができる。さらに、後述するようにロック材の粒度変動傾向監視が可能となることで、従来の定量 (堰ダムの場合、1 回/5 万 m^3) 毎に行う粒度試験よりも密な品質管理が可能となり、フィルダムの品質向上に資することができる考える。

8.5 施工品質の変動を考慮した合理的な品質管理手法の提案

8.5.1 画像粒度モニタリング®を併用した材料管理

画像粒度モニタリング®システムは CSG 材やロック材に適用可能であり、本論文で論じた事例以降も、CSG 材の製造管理、セメント改良土母材の粒度管理、フィルタ材の粒度管理など実績を重ねつつある。本システムの導入によって、対象材料の粒度変動を監視できるため、図-8.37 の本システムを併用した品質管理フロー(案)に示すように、粒度変動の有無に応じて粒度試験を実施できる。

ロック材を例にすると図-8.38 に示すように、従来の方では施工量(1日当たり1万 m³超)に対する試験頻度(1回/2~3日)が十分とは言えず、一時的に所定の粒度範囲を逸脱してもこれを検知することができない。一方、本システムを導入すれば、粒度変動を検知した場合は粒度試験を実施し、粒度が安定している場合は粒度試験を削減できる。つまり、使用材料の粒度変動を考慮した品質管理の合理化が実現できると考える。

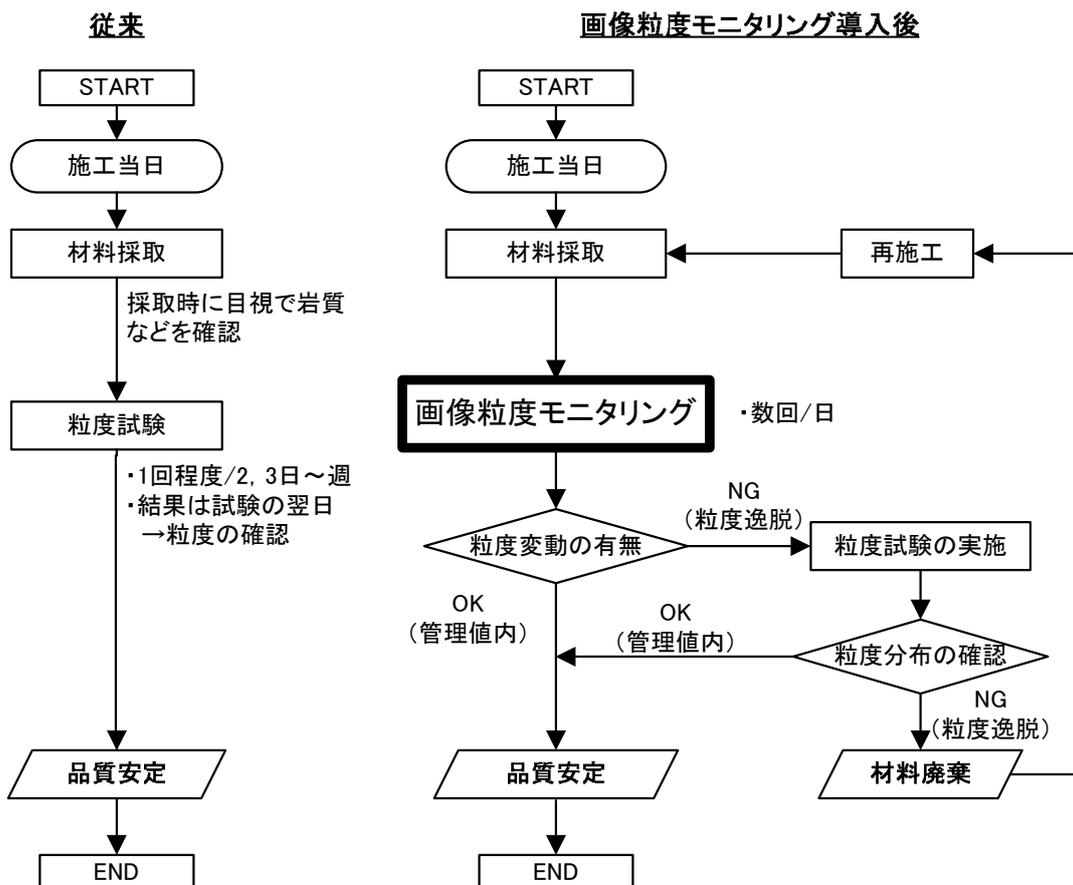
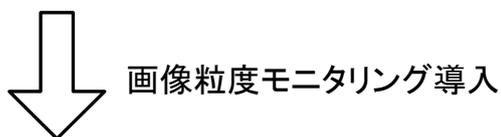
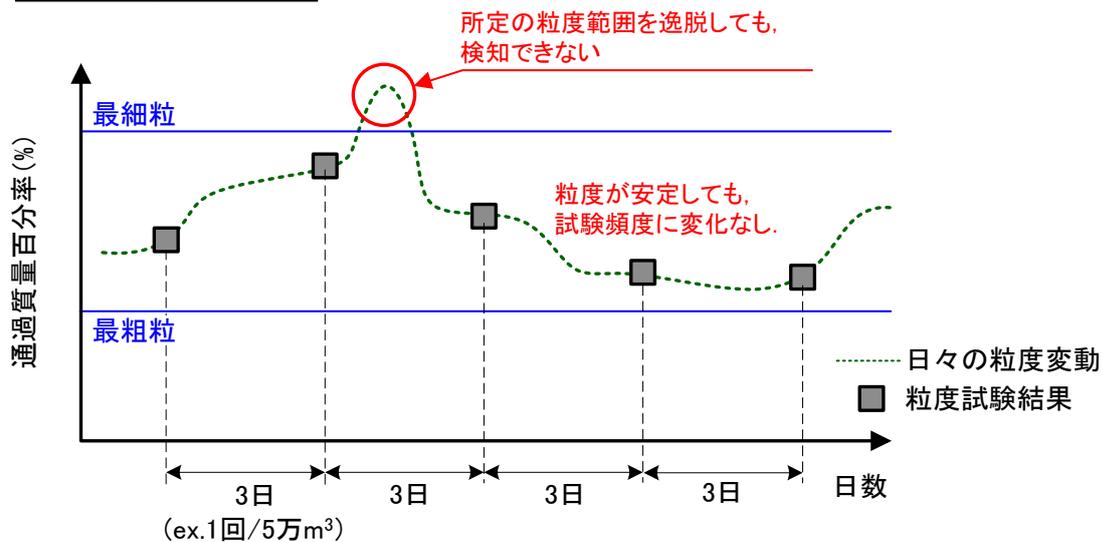


図-8.37 画像粒度モニタリングを併用した品質管理フロー(案)(ロック材の場合)

従来の粒度管理方法



品質変動を考慮した粒度管理の合理化

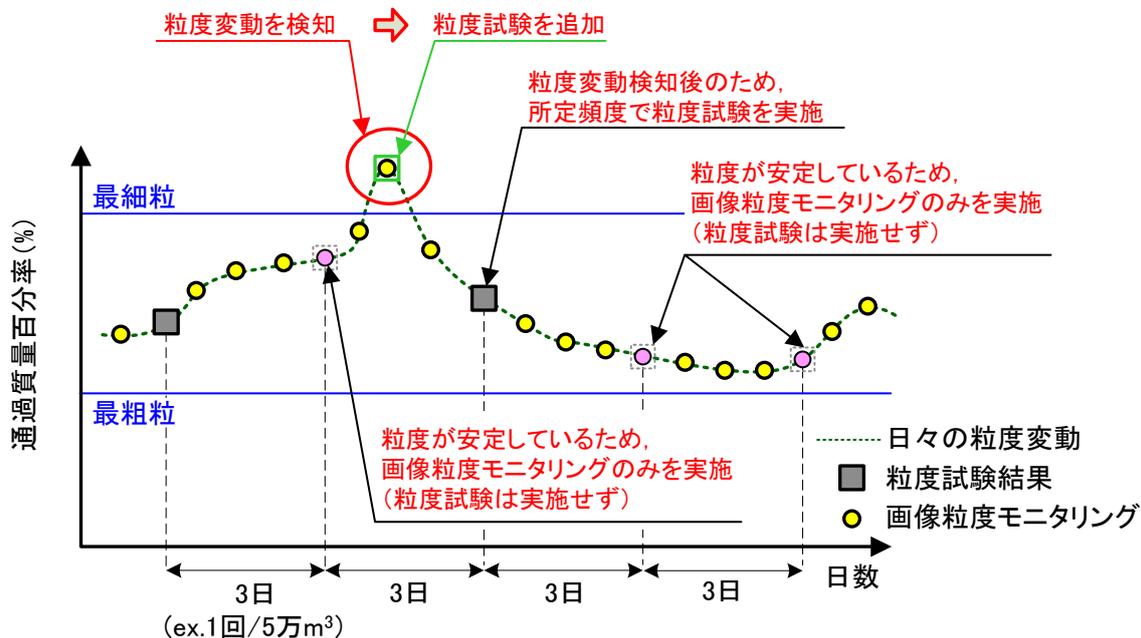


図-8.38 品質変動を考慮した粒度管理の合理化イメージ (ロック材の場合)

8.5.2 施工品質の変動を考慮した合理的な品質管理手法

フィルダムをはじめとする土木構造物建設工事の品質管理において、材料管理と工法管理（施工プロセス管理）が品質確保の両輪であることはいうまでもない。近年では ICT による工法管理はすでに多くの適用実績を重ねており、これによって施工プロセスのリアルタイムかつ全数管理が可能となっている。一方で、材料管理はこのようなリアルタイムかつ全数管理が可能な技術が確立されておらず、現在でも従来の定時または定量間隔で実施する抜取検査方式を主体としている⁸⁻⁵⁾。

画像粒度モニタリング[®]システムは、図-8.39 に示すように材料管理における品質変動監視技術の一つとして適用することを考えている（なお、重要な材料品質である含水比については、電子レンジ法やフライパン法などの迅速測定方法や RI 法などによるリアルタイム測定方法が実用化されている）。

このことによって、材料管理も ICT による工法管理と同等のリアルタイムな管理が可能となり、土木構造物建設工事における品質管理の高度化ならびに合理化に資することができると考えている。

また、本システムのようなリアルタイム品質変動監視技術を導入することによってフィルダム施工・品質管理方法のさらなる高度化技術である「**施工品質の変動を考慮した合理的な品質管理手法**」が実現できる。

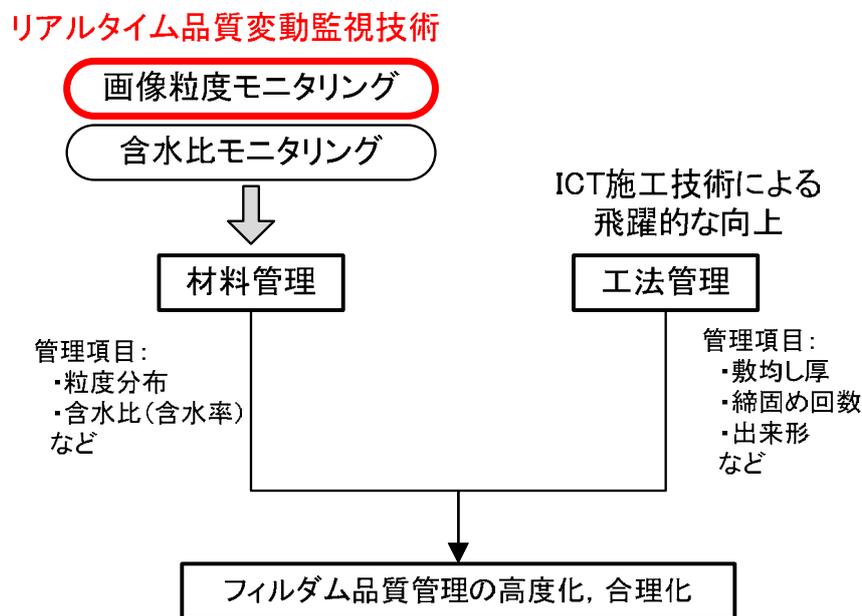


図-8.39 リアルタイム品質変動監視技術による品質管理の高度化，合理化イメージ

8.6 第8章のまとめと今後の課題, 展望

8.6.1 まとめ

第8章では、台形CSGダムである当別ダム(2章(7)参照)、殿ダム(2章(6)参照)などで実績を挙げた「デジタルカメラ画像を用いた土質材料の粒度変動監視システム」(画像粒度モニタリング[®]システム)と、これを用いた**施工品質の変動に考慮した合理的な品質管理手法**について論じた。

本章の内容を以下にまとめる。

- 1) 著者は、近年飛躍的な発展を遂げている画像解析技術に着目し、デジタルカメラで撮影した土質材料の画像を解析して、粒度分布の変動傾向を迅速に監視するシステムを開発し、実用化した。
- 2) 本システムをCSG材の粒度変動傾向監視手法として当別ダムCSG施工当日の品質管理に本格的に導入し、RI法含水率モニタリングシステムと併せてCSG材のリアルタイム品質変動監視を行った。そして、リアルタイム品質変動監視を併用した新しいCSG材品質管理フローを構築し、これに基づいて品質管理を行った結果、CSG材の品質が安定している場合は品質管理試験頻度を低減し、品質管理試験(簡易法試験)の回数を変動監視技術導入前に比べて約40%低減することができた。
- 3) 本システムをロックフィルダム堤体で最大の体積を占め、近年ダム堤体の地震時安全性の観点から粒度分布と締固めが重要とされているロック材の粒度変動傾向監視手法として殿ダム品質管理に試行的に導入した結果、本システムが品質管理手法として十分に適用できることを確認した。
- 4) 本システムは本論文での事例(当別ダムCSG材、殿ダムロック材)以降も、CSG材の製造管理、セメント改良土母材の粒度管理、フィルタ材の粒度管理など、実績を重ねつつある。本システムの導入によって対象材料の粒度変動を監視できるため、粒度変動の有無に応じて粒度試験を実施できる。
- 5) 本システムをフィルダムや台形CSGダムの材料管理にリアルタイム品質変動監視技術として導入することによって、フィルダム施工・品質管理方法のさらなる高度化技術である「**施工品質の変動を考慮した合理的な品質管理手法**」が実現できる。

8.6.2 今後の課題と展望

画像粒度モニタリング[®]ならびに施工品質の変動に考慮した合理的な品質管理手法の今後の課題と展望としては、以下のような事項が挙げられる。

1) 画像粒度モニタリング[®]

➤ 細粒分を含む材料に対する拡大

- ・ 現状のデジタルカメラ画像解析の分解能は最大粒径の3%程度、粒子識別を考慮した粒径は最大粒径の10%程度である。
- ・ デジタルカメラ画像解析の分解能を高くできれば、フィルダムのコア材料のような細粒分を多く含む材料に対しても本システムが適用できるようになり、品質管理試験のさらなる合理化が可能となる。

➤ 全数管理に向けたシステム化

- ・ 本システムは、試験時間を従来の粒度試験に比べて大幅に縮減できるが、現状では、材料の全数管理は実現できていない。
- ・ 全数管理のためには、合理的な確認場所(例えば、材料積込み時、盛立面へのまき出し時など)や確認方法(ダンプトラックのベッセル上、または盛立面での敷均し完了時など)など、本システムを導入した場合の品質管理方法を考慮して、フィルダム建設現場における新しい施工・品質管理システムを構築する必要がある。

➤ 更なる画像解析技術の高度化による新たな可能性

- ・ カラー画像の解析技術を導入することによって、材料の含水比に関する情報も定量化できる可能性がある。

2) 施工品質の変動を考慮した合理的な品質管理手法

➤ 品質管理における適正な管理ロットの設定

- ・ フィルダム建設工事の材料管理では、最適な管理ロットが明確になっていない。
- ・ 本システムで材料の品質変動監視が可能になるが、その一方でフィルダムの各ゾーンの機能、そして施工数量や施工能力などに応じて適切な管理ロットを設定しなければ、管理試験項目と管理頻度だけがいたずらに増加するだけになる可能性がある。

➤ 確率論に基づいた品質管理項目、頻度の設定

- ・ 現在のフィルダム品質管理では、一切の不良率を見込んでいない。しかし、ばらつきが大きな自然材料を使用するため、不良率を見込まないとすると、過度に大きな安全率が必要となる。
- ・ より合理的な品質管理への転換と実現のためには、その基礎的な検討として工業製品と同様に確率論に基づいた品質管理項目ならびに管理頻度の設定に関

する研究が待たれる。

➤ **新技術を積極的に導入した品質管理基準の実現**

- ・ 現状の品質管理基準は、堤体積などのダム規模によらず、類似のダムや近傍のダムの品質管理項目および管理頻度を流用している事例が多いとされている。
- ・ ICT 技術による工法管理や本システムのような新技術が実績を挙げつつあるが、新技術の効果を踏まえた品質管理基準の見直しはほとんどなされていない。つまり、新技術が導入されても品質管理項目と管理頻度は旧態依然としている。
- ・ ICT 技術による工法管理や本システムなどを導入して、施工品質の変動を考慮した合理的な品質管理を実現するためには、新技術の導入とその効果が仕様書などで規定される品質管理基準に反映されることが必要である。

謝 辞

画像粒度モニタリング®システムの開発と実用化に当たり有益なご指導を賜った(財)ダム技術センター、当別ダム本体建設工事でご活用頂いた北海道空知総合振興局ならびに殿ダム建設工事でご活用頂いた国土交通省中国地方整備局の関係者の方々に心から御礼申し上げます。

【参考文献】

- 8-1) 松本徳久:我が国フィルダムの設計・施工の変遷, 土木学会論文集 F, Vol.65, No.4, pp.394-413, 2009.10.
- 8-2) (財)ダム技術センター:台形 CSG ダム施工・品質管理技術資料, 2012.6.
- 8-3) 上野信二, 中瀬弓人, 佐藤裕之, 藤澤侃彦:当別ダムの設計・施工(その 6)ー当別ダムにおいて工夫した施工技術ー, ダム技術, No.298, pp.59-85, 2011.7.
- 8-4) (社)土質工学会:粗粒材料の現場締固め, p.68, 1990.
- 8-5) 日下雅史, 後藤誠志, 山田啓一, 柴藤勝也, 伊藤文夫:殿ダム本体工事における情報化施工技術の導入, ダム技術, No.301, pp.79-86, 2011.10.