

画像処理および非接触水分計による CSG 品質管理システム

— 台形 CSG ダムの品質を確保した生産性向上システム —

国井 聡^{*1}・田中 麻帆^{*2}・安井 利彰^{*3}・笹倉 伸晃^{*1}・高野 正年^{*4}・中島 具威^{*4}

System of CSG by Image Processing and Noncontact Moisture Meter

Productivity Improvement System ensuring the quality of the trapezoidal CSG dam

Satoshi KUNII, Maho TANAKA, Toshiaki YASUI, Nobuaki SASAKURA, Masatoshi TAKANO, Tomoi NAKASHIMA

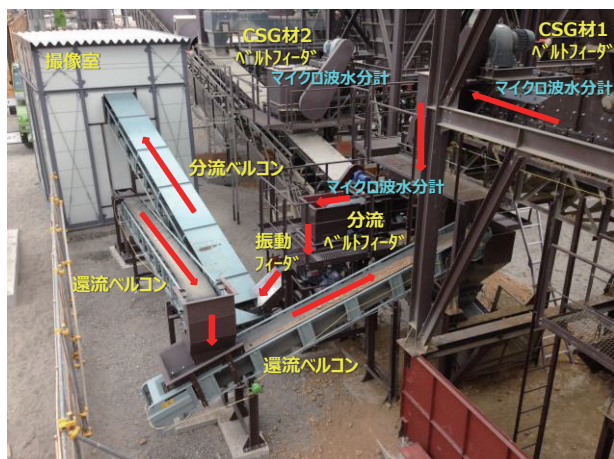


図-1 品質管理システム

物性	CSG材1 現地発生砂	CSG材2					備考
		-5mm	10-5mm	20-10mm	40-20mm	80-40mm	
粒度	一定割合 (1回/日)	画像処理システムによる粒度推定 (15分/h)					システム
表乾密度	3日前試験 (1回/日)	3日前試験 (1回/日)	3日前試験 (1回/日)	3日前試験 (1回/日)	3日前試験 (1回/日)	3日前試験 (1回/日)	試験室
吸水率							
含水率	マイクロ波 (15分/h)	画像処理 (15分/h)	マイクロ波 (15分/h)	前日試験 (1回/日)	前日試験 (1回/日)	前日試験 (1回/日)	システム + 試験室

各粒径の含水率を密度および吸水率に基づき表面水量に変換

※粒度と含水率を考慮した表面水量により精度の良い単位水量補正を実現

表面水量	=	表面水量 (砂)	+	表面水量 (-5)	+	表面水量 (10-5)	+	表面水量 (20-10)	+	表面水量 (40-20)	+	表面水量 (80-40)	システム
------	---	-------------	---	--------------	---	----------------	---	-----------------	---	-----------------	---	-----------------	------

【CSG配合補正】単位水量決定 = 表面水量 + 給水量 (頻度: 1回/15分)

図-2 単位水量決定の概念図

研究の目的

近年普及されつつある CSG 工法は、CSG の大量高速製造や汎用大型重機による施工により、築堤構造物の急速施工が可能である。CSG 工法で使用する CSG 材は、工事発生土を基とし、分級や粒度調整、洗浄等を行う必要がなく、堤体に必要な強度を担保するための品質管理手法「ひし形理論」が確立されている。CSG はひし形理論により、材料の粒度分布や単位水量に関して、所定の管理範囲内のばらつきを許容している。一方で、CSG は材質の変動を許容する反面、粒度や表面水量が変動することが明らかである。そのため、CSG の製造にあたっては、材料の粒度および含水率を管理するために、簡易法による日常品質管理試験を行う。現行の CSG 製造当日の品質管理方法では 1 時間に 1 回程度の頻度が限界であり、多大な労力と費用が要求される。

そこで、著者らは人力による品質管理試験を全自動化する品質管理システムを開発することにより、日常管理試験頻度の低減ときめ細かい品質管理を目指した。本報では、品質管理システムの概要を説明するとともに、試験運用結果について報告する。

技術の説明

CSG 材は適時、その品質を試験することで、必要な CSG 強度を担保できるよう管理する。システムは、得られた画像処理による粒度分布とマイクロ波水分計による含水量に加え、施工前日までの品質管理試験にて測定する粒度区分ごとの吸水率および表乾密度を用いて、CSG の表面水量を推定する。推定した表面水量に応じて、所定の単位水量に対する必要な給水による配合修正を実施する。

主な結論

本研究では、室内試験および CSG 品質管理プラントでの試験運用において、本システムの適応性を現行の簡易法による品質管理試験と比較しながら検証した。これにより、本システムが CSG 材の粒度分布および表面水量の変動傾向を良好に把握できることを確認した。また、現行の 1 回/時間の品質管理頻度に対して、例えば 1 回/15 分の高頻度で管理することも可能であり、本システムの有用性を確認した。

*1 本店 土木事業本部 土木技術部
*3 本店技術研究所 生産性革新技術研究室

*2 本店 技術研究所 地盤・環境研究室
*4 中部支店 浜松 CSG 防潮堤作業所

画像処理および非接触水分計によるCSG品質管理システム —台形CSGダムの品質を確保した生産性向上システム—

國井 聡^{*1}田中 麻穂^{*2}安井 利彰^{*3}笹倉 伸晃^{*1}高野 正年^{*4}中島 具威^{*4}

要 旨

CSG工法は、CSG製造プラントによる高速大量製造や、汎用大型重機による施工により、築堤構造物の急速施工を可能とする工法である。加えて築堤に使用されるCSG材は、試験施工等で定めた範囲内において、粒度分布や表面水量のばらつきを許容しているため、現地で採取する土砂を合理的に使用することが可能である。CSG材の施工当日の品質管理においては、粒度および含水率を把握し、許容範囲内でCSG単位水量を管理することが重要である。

当社が『平成25年度〔第25-K5611-01号〕浜松沿岸域津波対策施設等整備事業（海岸）工事（舞阪工区CSG製造工）』に導入した品質管理システムは、CSG材の粒度分布と表面水量の変動を自動で連続的に把握し、その結果からCSGの単位水量を調整するものであり、画像処理技術による粒度推定と、非接触型水分計のマイクロ波水分計による含水率計測という2つの要素技術により構成されている。本システムによる品質管理を行うことで、高速大量製造時においても従来と同等以上の品質管理が可能となり、品質の確保と生産性の向上が実現される。本報では、本システムの試験運用結果について報告する。

キーワード 画像処理／非接触水分計／品質管理／CSG工法

目 次

- | | |
|-------------------|-------------------|
| 1. はじめに | 4. 品質管理システムの試験的運用 |
| 2. 品質管理システム概要 | 5. まとめ |
| 3. 品質管理システムの適応性検討 | |

Quality Control System of CSG by Image Processing and Noncontact Moisture Meter —Productivity Improvent System ensuring the quality of the trapezoidal CSG dam—

Satoshi KUNII
Toshiaki YASUI
Masatoshi TAKANO

Maho TANAKA
Nobuaki SASAKURA
Tomoi NAKASHIMA

Synopsis:

The CSG construction method can be constructed quickly by high-speed mass production of CSG. On the other hand, we must monitor changes in materials by conducting daily management tests.

The quality management system introduced to the Hamamatsu CSG Coastal Levee is aimed at automatically manage this change. This system consists of two technologies, Measurement of water content by particle size measurement technology by image processing and noncontact moisture meter. This system automatically calculates the surface water quantity. In order to improve the calculation accuracy of surface water quantity, we are developing this system.

* 1 本店 土木事業本部 土木技術部

* 2 本店 技術研究所 地盤研究室

* 3 本店 技術研究所 生産性革新技術研究室

* 4 中部支店 浜松 CSG 防潮堤作業所

1. はじめに

1.1 背景

近年 CSG 工法は、台形 CSG ダム以外の築堤構造物にも普及されつつある。CSG 工法は、CSG 製造プラントでの高速大量製造や汎用大型重機による施工により、急速施工が可能であることが特徴である。また、CSG 工法で使用する CSG 材は、現場近傍から容易に調達できる岩質材を対象とする場合が多く、分級（オーバーカットは必要）や粒度調整、洗浄等の煩雑な前処理を行う必要がない。

一方で、堤体に必要な強度を担保するための品質管理手法として「ひし形理論」が確立されている¹⁾。CSG 材の粒度分布と配合に必要な単位水量を管理することにより、施工上必要な CSG の強度を確保する。そのため、岩質材である CSG 材の粒度分布を把握し、適切な単位水量をなるよう給水調整することが必要となる。CSG の製造では、計画配合段階で配合する単位水量が決定しているものの、実際の現場配合においては、CSG 材の表面水量を考慮する必要がある、[1]式で示される。

$$\text{単位水量} = \text{表面水量} + \text{給水量} \quad [1]$$

表面水量とは、湿潤状態の土粒子において、土粒子内部の空隙に満たされた水を除く、表面に付着した水のみのことである²⁾。表面水量を適切に把握することで、最適な量の給水をすることができる。この表面水量は、粒度分布、吸水率、表乾密度、含水率から算出するため、各項目の品質管理試験を実施する事で把握する。

現行の CSG 製造時の品質管理手法では、製造前に CSG 材の性状を把握するため、製造の 3 日前から品質管理試験を実施し、表面水量を把握するために必要な CSG 材の性状を把握している。これらの試験は、人力によるため多大な労力と費用が要求される。特に、製造当日に実施する品質管理試験は、時間変動する CSG 材の性状を正確に把握し、CSG 配合へ反映させる必要があるため適時実施する。しかしながら、非常に煩雑な試験であることから、1 時間に 1 回程度の頻度が限界である。CSG 製造能

力を向上させるためには、連続的に CSG 材の性状を測定可能で、現行の方法を省力化できる品質管理手法の確立が不可欠となっている。

著者らは、今後需要拡大が見込まれる CSG 工法に対し、生産性向上が本工法での課題であると考え、品質管理システムによる品質管理試験の自動化による製造プラントの処理能力向上に取り組んでいる。そのため、粒度と含水率を自動的に管理可能な品質管理システムの開発を進めてきた³⁾。本システムの運用により、連続的な品質管理が可能となるとともに、現行の日常管理試験頻度を低減できる。本報では、品質管理システムの概要を説明するとともに、試験運用結果について報告する。

1.2 浜松 CSG 防潮堤工事概要

『平成 25 年度〔第 25-K5611-01 号〕浜松沿岸域津波対策施設等整備事業（海岸）工事（舞阪工区 CSG 製造工）』（以下、浜松防潮堤工事と称する）においては、CSG 工法による防潮堤を建築中である。浜名湖から天竜川河口までの延長 17.5km に及ぶ工事であり、甚大な津波被害が想定される南海トラフ巨大地震の被害を軽減することを目的としている。

当社は同工事において、CSG の製造を担当しており、材料としては、CSG 材 1（岩質材）と CSG 材 2（現場発生砂）を混合させたものを材料として使用している。CSG 材 1 は、浜松市天竜区の阿蔵山で採取される段丘材および泥岩などの岩質材であり、CSG 材 2 は、防潮堤基礎の掘削により発生する現地発生砂である。

本工事にて採用した CSG 製造設備である大規模連続式混合プラントの外観を写真-1.1 に示す。同プラントでは、当社が開発した重力利用型連続式混合装置（M-Y ミキサ）を使用することで、連続的に CSG の大量製造を可能にしている。

1.3 従来の CSG 材品質管理試験

CSG 工法では、配合上必要な単位水量に応じた加水調整を実施するために表面水量の算出が必要である。そのため CSG 工法では、製造前に CSG 材の性状を把握する

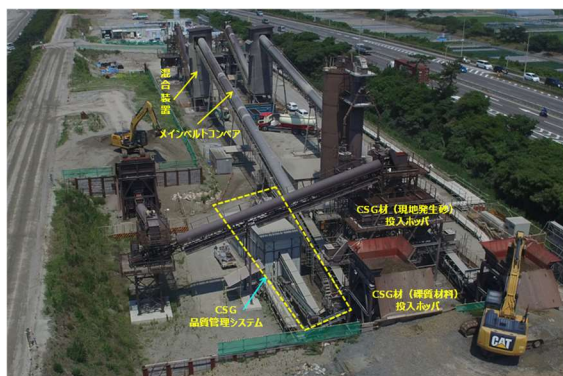


図-1.1 大規模連続式混合プラント



図-1.2 CSG 材 1（左：段丘材，中央：泥岩）
および CSG2（右：現地発生砂）

ため3段階の品質管理試験によって必要な CSG 材の性状を把握する。CSG 材の粒度毎の表乾密度、吸水率、含水率を求める必要があり、これらの分析を3日間にかけ実施している。表乾密度・吸水率試験は CSG 製造の3日前から実施しており、粒度区分 80-5mm に該当する岩質材の試験は『細骨材の密度および吸水試験方法 JIS A 1110』に準じ、粒度区分 5mm に該当する現場発生砂の試験は『細骨材の密度および吸水試験方法 JIS A 1109』に準じて行う。CSG 材の含水率試験は CSG 製造の前日に実施し、各粒度区分の炉乾燥における重量変化率から CSG 材の含水率を計測する。湿潤ふるい法による粒度分布測定と、電子レンジ法（JGS 0122-2000）による含水率測定は、CSG 製造当日に実施している。

CSG 工法による築堤構造物の施工に際しては、施工当日の CSG 材の品質管理として、1時間に1回程度の頻度で表面水量を算出し、目標単位水量に対する給水量を補正することが推奨されている^り。なお、CSG 材の表面水量は、図-1.3 に示すように、粒度分布および粒度区分毎の含水率の計測結果を用いることにより、粒度のばらつきによる表面水量の変動を把握することができる。これは、CSG 材全粒径での含水率が等しくても、粒度分布が異なれば CSG 材全体の表乾密度および吸水率は大きく異なり、算出する表面水量に差が生じるためである。そこで、CSG 製造当日に実施する湿潤ふるい法による粒度分布測定と、電子レンジ法による含水率測定は1回/時間ごとに実施し、粒径区分毎の含水率を把握することによって精度良く表面水量を算出し、表面水量の変動傾向を監視できるように試みている。

2. 品質管理システム概要

本システムは、従来法において1回/時間実施していた湿潤ふるい法と電子レンジ法を代替するものである。画像処理技術により測定した粒度分布と、非接触型水分計であるマイクロ波水分計により測定した含水率に加え、CSG 製造前日までに測定した粒度区分ごとの吸水率および表乾密度を用いて CSG 材の表面水量を算出する。そし

て、算出した表面水量に応じて、目標単位水量に必要な給水を実施することが可能である。

CSG 品質管理システムは CSG 材の材料投入箇所の直後に設置されている。本システムの全体写真を図-2.1 に示す。システムは3台のマイクロ波水分計と撮像部から構成されている。マイクロ波水分計は、CSG 材1ベルトフィーダ、CSG 材1分流ベルトフィーダおよび CSG 材2ベルトフィーダに設置した。また、撮像部には、照明設備とデジタルカメラを設置しており、CSG 材1分流ベルトコンベアから分流した試料を一定の頻度で撮像できる。撮像後の CSG 材2は還流ベルトコンベアにて、自動で CSG 製造設備に返送される。

2.1 画像処理による粒度算出

(1) 画像処理のメカニズム

本システムによる粒度の算出技術は、CSG 材を写真撮影した画像から解析して求めるものである。図-2.2 に CSG 材の流下設備の全体写真を示す。本システムでは、流下中の CSG 材を連続撮像することで、土粒子形状に関するパラメータを記録する。外的影響を受けない暗室内に照明設備を設けることで常に明度が均一な撮像環境を設定した。そして、測定対象の CSG 材（約30kg）をベルトコン上に薄層で搬送し、流下設備から流下中の CSG 材を撮像機器で正面から連続撮像する。

画像処理のメカニズムを図-2.3 に示す。撮像画像はリアルタイムに解析 PC へ転送され、撮像画像を二値化処理し背景を黒色、土粒子を白色として分離することで、土粒子1つ1つを認識することができる。そして、二値化処理した画像から得られる土粒子短径を基に、各土粒子を粒径区分ごとに分類する。画像処理により得られるパラメータは、平均短径、平均長径、土粒子数、体積及び体積率である。体積とは、画像処理により検出した土粒子をモーメント等価楕円として変換したものであり、[2]式により求められる。



図-1.3 従来の単位水量決定の概念図

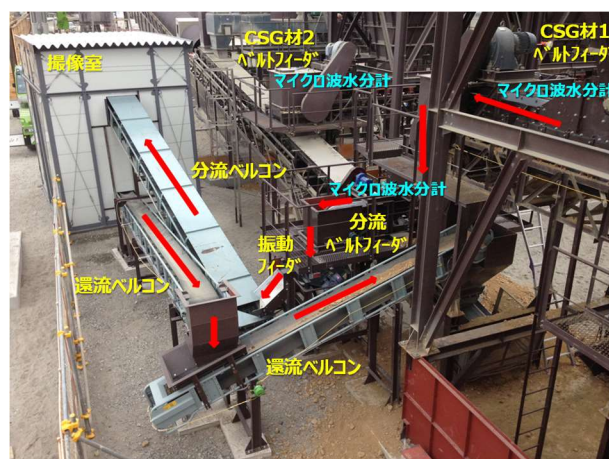


図-2.1 品質管理システムの全景

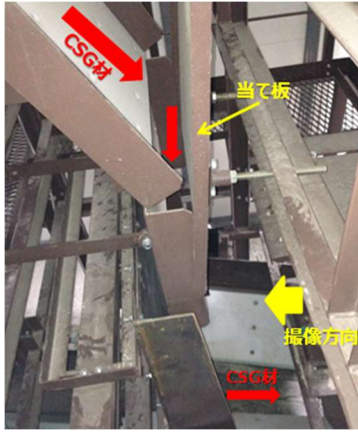


図-2.2 CSG 材の流下設備

$$V=4/3\pi\times(d/2)^2\times D/2 \quad [2]$$

ここに、

V：体積（mm³）

d：土粒子平均短径（mm）

D：土粒子平均長径（mm）

これらのパラメータを説明変数とし、現行のふりい試験結果から求められる質量率を目的変数として重回帰分析を実施することにより粒度推定を行う。

(2) 重回帰分析による粒度推定

CSG 材の粒度推定は重回帰分析によりもとめた算出式により行う。算出式は、土粒子平均面積と土粒子体積率を説明変数とし、現行のふりい試験より得られる質量率を目的変数とした。土粒子平均面積は、土粒子を楕円として近似して求めたものであり、平均短径と平均長径より導出できる。土粒子を楕円形と仮定し、画像処理結果を用いて、[3]式により算出する。

$$s=\pi\times d/2\times D/2 \quad [3]$$

ここに、

s：土粒子平均面積（mm²）

d：土粒子平均短径（mm）

D：土粒子平均長径（mm）

[4] 式に重回帰分析により求めた画像処理粒度の算出式を示す。

$$M=xA+yB+z \quad (x, y, z: \text{定数}) \quad [4]$$

ここに、

M：質量率（%）

A：土粒子平均面積（mm²）

B：土粒子体積率（%）

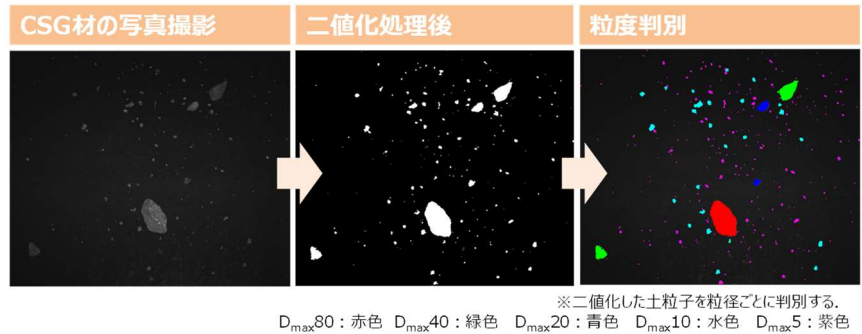


図-2.3 CSG 材画像処理フローの概念図

なお、算出式の定数 x, y, z は CSG 材の性状変化に対応できるように、適宜更新していく。

更に、含水率の変動が粒度推定の精度に及ぼす影響を考慮した。含水率が高い場合、細粒分が団粒化を生じるため、含水率が低い状態と比較して、粒度の測定精度が劣るおそれがある。そこで、含水率に応じて異なる重回帰式を使用できるように設定した。マイクロ波水分計によりリアルタイムに計測した含水に閾値を定め、大小 2 区分の含水率に選別する。選別された試料は、高含水率あるいは低含水率専用の粒度算出式によって粒度分布を求めることができる。

2.2 含水率の算出方法

(1) マイクロ波水分計計測原理

本システムでは、含水率の測定技術として非接触型水分計のマイクロ波水分計を採用した。図-2.5 にマイクロ波水分計装置外観を示す。マイクロ波とは 300MHz～30GHz の波長であり、水などの誘電体により吸収される性質を有している。本プラントに設置したマイクロ波水分計は、この性質を利用しており、試料を挟み込むようにマイクロ波照射部（上部）と受信部（下部）を設置する。計測原理の概略図を図-2.6 に示す。照射したマイクロ波が試料を透過する際に吸収され、減衰されたマイクロ波を受信し電圧として出力している。高含水率の試料はマイクロ波が減衰されやすく、低含水率の試料は減衰量が小さい、そして、測定したマイクロ波の電圧と、炉乾燥法により測定した試料の含水率（%）との一次相関式を作成する。本システムで設置するマイクロ波水分計は高速で含水率を測定することが可能なため、材料の含水率の変化をリアルタイムに検知する事ができる。対象の試料に接触せずに計測できるため、装置の摩耗が少なく、対象物に対しても物理的影響を及ぼさない。

(2) マイクロ波水分計の計測方法

本システムに実装しているマイクロ波水分計の計測概



図-2.4 マイクロ波水分計装置外観

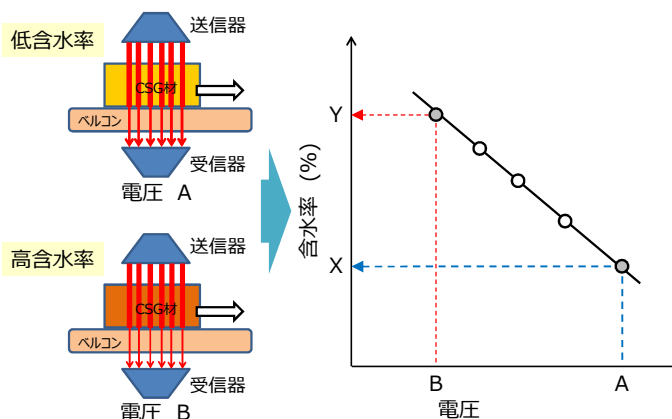


図-2.5 マイクロ波水分計の計測原理

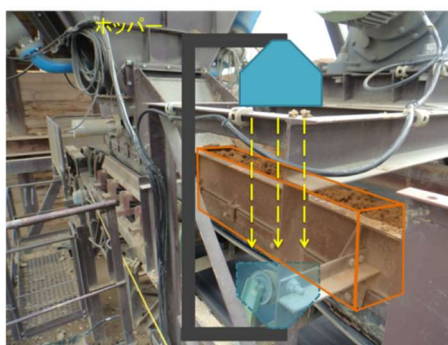


図-2.6 マイクロ波水分計の計測概念図

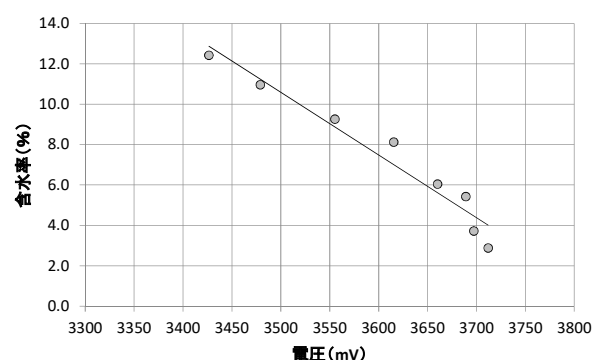


図-2.7 電圧と含水率との相関関係（現地発生砂）

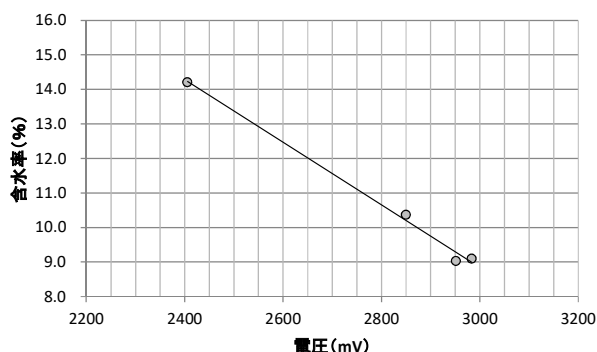


図-2.8 電圧と含水率との相関関係（泥岩）

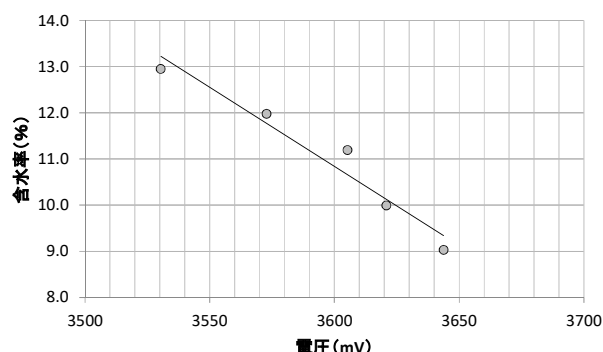


図-2.9 電圧と含水率との相関関係（段丘材）

念図を図-2.7 に示す。マイクロ波水分計は測定精度を担保するため、試料の密度を均一にする必要がある。そのため、ホッパーより搬入された CSG 材がベルトフィーダにより同一形状に切り出された直後の位置にマイクロ波水分計を設置した。

(3) マイクロ波水分計による含水率の測定

マイクロ波水分計は、対象となる試料に対して事前にキャリブレーション試験を実施し、得られる電圧と含水率の相関式を定めておく必要がある。そこで室内試験により、マイクロ波水分計で計測した電圧 (mV) と炉乾燥により含水率 (%) の相関式を求めた。図-2.8 に示すように、現場発生砂を用いると、電圧と含水率との間に良好な相関関係が得られることが分かる。同様に、岩質材である段丘材と軟外材に対して、室内試験により相関

関係を検証した。図-2.9 よび図-2.10 に示すように相関性が高いことが分かる。

2.3 システムによる表面水量の算出方法

本システムによる CSG 材の表面水量算出の流れを図-2.11 に示す。従来の方法と同様に、各粒度の CSG 材の表乾密度および吸水率は CSG 製造当日までの品質管理試験により把握し、製造当日はどちらも時間変動を考慮せず常に一定として仮定した。現行法と異なる点として、品質管理システムにより、画像処理による粒度分布測定およびマイクロ波水分計による含水率測定を実施するが挙げられる。一般的に、粗粒分よりも細粒分の方の含水率が高くなる事が推察される。そこで、粒度区分ごとに JIS A 1125「骨材の含水率試験方法および含水率に基づく表面水率試験方法」に準拠し、各粒度の表面水量を算出す

る。また、本システムは正確な表面水量を算出するため、それぞれの粒径区分ごとに適した方法を用いて含水率を計測することができる。従来法では 1 回/時間の頻度でしか計測できなかったが、本システムにより 1 回/15 分で表面水量を算出し、給水量調整による CSG 配合補正が可能である。

(1) CSG 材 1(粒径区分 20-10mm 以上)の含水率

CSG 製造当日の粒径区分 80-40、40-20 および 20-10mm については、従来の方法と同様に、前日に採取し含水率試験（炉乾燥法）で測定する。経験的に、これら粗粒分については、1 日の中で含水率の時間変動が少ないことが明らかであるため、経時変化がないものとして 1 日一定と仮定して用いる。

(2) CSG 材 1(粒径区分 10-5mm)の含水率

粒径区分 10-5mm の含水率は、ベルコンに設置したマイクロ波水分計の計測結果を基にして算出する。一方で、マイクロ波水分計による含水率の測定は、試料全量の含水率である。そこで、試料全量の含水率から他の各粒径区分の含水率を差し引いたものが、粒径区分 10-5mm の含水率であるとした。既に粒径区分 80-40mm、40-20mm および 20-10mm の含水率については、炉乾燥法による含水率計測の結果より把握できており、5mm 未満の含水率について後述する図 2.12 の関係から算出できる。これより、マイクロ波水分計により測定した全粒径の含水率と既知の粒径区分の含水率より、未知である粒径区分 10-5mm の含水率を測定する事ができる。

(3) CSG 材 1(粒径区分-5mm) の含水率

CSG 材は細粒分を含むため、含水率が高くなると団粒化が生じやすくなる。団粒化のイメージを図-2.13 に示す。土粒子が絶乾から表乾状態の場合、ほとんど団粒化の影響は生じない。一般的に、含水率が高くなるにつれて細粒分が吸着し合い団粒化が生じやすい。そのため、さらに含水率が高くなると、実際は粒径区分が 5mm 未満であっても、画像処理上で短径 5mm 以上と判定された一部の土粒子が、粒径区分 10-5mm に分類されることがある。

そこで、細粒分を含む粒径区分-5mm 未満の表面水量は、画像処理パラメータである平均土粒子面積に着目して算出する。図-2.12 に示すように粒径区分 5mm 未満の含水率と平均土粒子面積には相関関係がある。この関係より含水率の相関式を事前に作成し、画像処理より得られた平均土粒子面積を算出式に代入することによって、粒径区分 5mm 未満の含水率を測定することが可能となる。

(4) CSG 材 2 の含水率

CSG 材 2(現場発生砂)の含水率については、ベルコンに設置した専用マイクロ波水分計を用いて計測する。

物性	CSG材1 現地発生砂	CSG材2					備考
		-5mm	10-5mm	20-10mm	40-20mm	80-40mm	
粒度	一定割合 (1回/日)	画像処理システムによる粒度推定 (1回/15)					システム
表乾密度	3日前試験 (1回/日)	3日前試験 (1回/日)	3日前試験 (1回/日)	3日前試験 (1回/日)	3日前試験 (1回/日)	3日前試験 (1回/日)	試験室
吸水率							
含水率	マイクロ波 (15分/h)	画像処理 (15分/h)	マイクロ波 (15分/h)	前日試験 (1回/日)	前日試験 (1回/日)	前日試験 (1回/日)	システム + 試験室

各粒径の含水率を密度および吸水率に基づき表面水量に変換
※粒度と含水率を考慮した表面水により精度の良い単位水量補正を実現

表面水量	=	表面水量 (砂)	+	表面水量 (-5)	+	表面水量 (10-5)	+	表面水量 (20-10)	+	表面水量 (40-20)	+	表面水量 (80-40)		システム
------	---	-------------	---	--------------	---	----------------	---	-----------------	---	-----------------	---	-----------------	--	------

【CSG配合補正】単位水量決定 = 表面水量 + 給水量

図-2.10 品質管理システムによる
単位水量決定の概念図

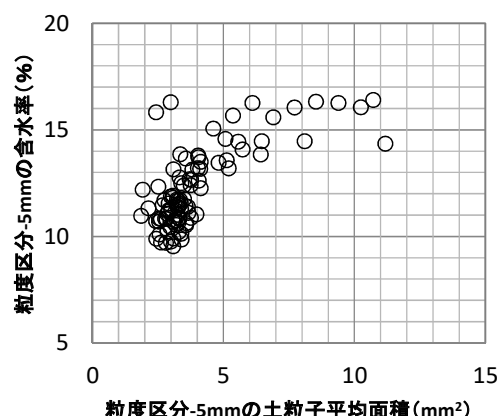


図-2.11 粒径区分-5mm の土粒子平均面積と
含水率の関係

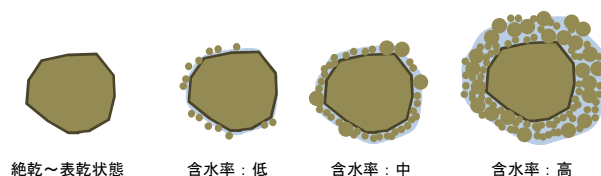


図-2.12 含水量と団粒化の考え方

3. 品質管理システムの適応性検討

3.1 画像処理による粒度推定技術の検証

CSG 材 1 として段丘材を使用する場合、泥岩より含水率が高く、概ね含水率 6～8%の間を変動するが、10%を超える高含水率の場合もある。高含水率の材料では細粒分が団粒化し、粒度推定の精度が低下することが想定されるため、含水率の変動が粒度推定に与える影響を把握しておく必要がある。そこで、含水率を調整した試料を使用し、画像処理による粒度測定精度を検証した。既に 2.1(2)にて述べたとおり、本システムにはマイクロ波水分計により計測した含水率の大小により、粒度測定式を選択できる機能を有している。そこで、一律の粒度測定式によって求めた画像処理粒度と、含水率によって選択した粒度測定式の精度を確認した。

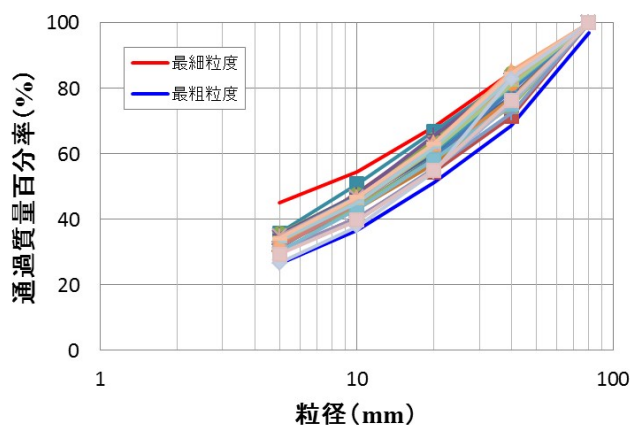


図-3.1 本検討に用いた段丘砂礫の通過質量百分率

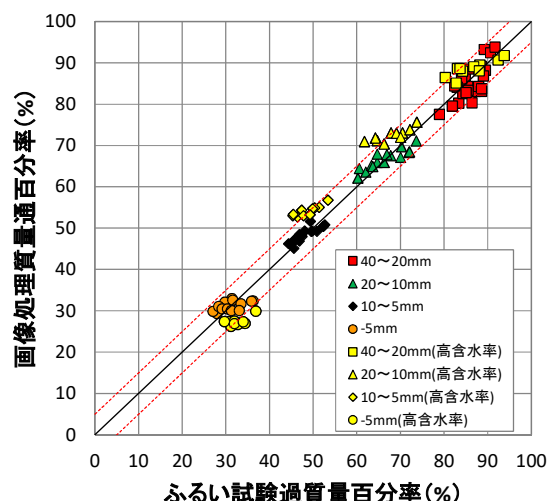


図-3.2 段丘砂礫の通過質量百分率比較

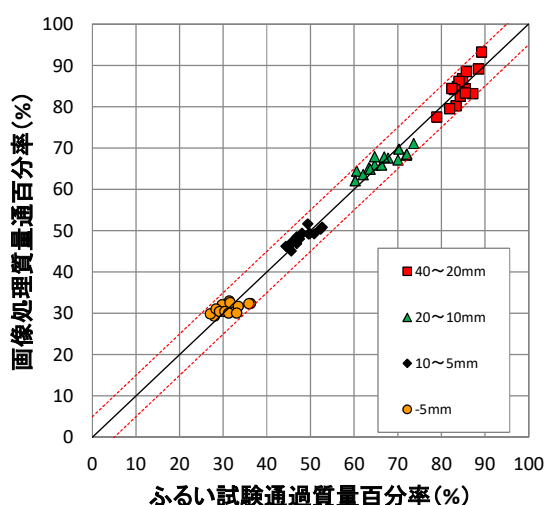


図-3.3 低含水率段丘砂礫の通過質量百分率比較

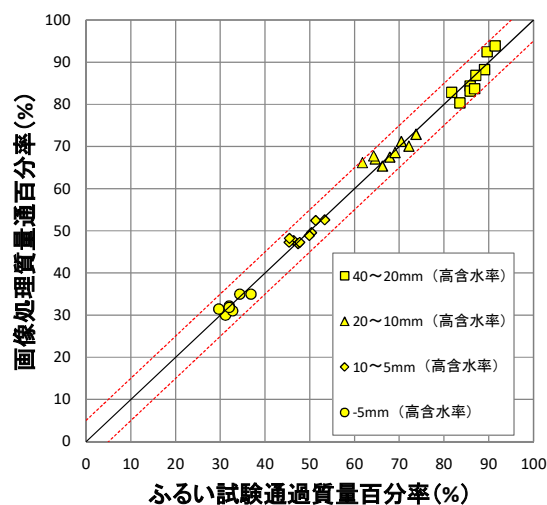


図-3.4 高含水率段丘砂礫の通過質量百分率比較

(1) 検討試料

本検討で用いた段丘材の粒度分布をふるい試験によって測定した。本検討で用いた試料は、図-3.1 のみと最細粒度から最粗粒度にかけて幅広い粒度分布を有している。画像処理による粒度推定を行い、現行のふるい試験結果との比較を行った。いずれの試料においても自然状態で含水率 6.8%程度であった。そこで、高含水率の試料を準備するため、これらの試料に加水し、含水率 10%程度の試料を作製した。

(2) 検討結果

ふるい試験結果と画像処理により求めた画像処理粒度の通過質量百分率の比較を図-3.2 に示す。含水率の大小によらず、全試料を用いて重回帰分析により粒度測定したところ、高含水率の試料については、各粒度の通過質量百分率の誤差が $\pm 5\%$ 以上であった。これは、CSG 材の中でも吸水率の大きい細粒分ほど、高含水率下における団粒化の影響の影響を受けるためだと考えられる。

そこで、本システムに実装した含水率による粒度測定

式選択機能の有効性を検証した。高含水率と低含水率ごとにそれぞれ粒度測定式を作成し、通過質量百分率を算出した。検討結果を図-3.3 と図-3.4 に示す。図-3.3 は含水率 6.8%のみの試料を用いて算出した画像処理粒度分布であり、図-3.4 は含水率 10%のみの試料の結果である。図-3.2 においては、推定誤差は $\pm 5\%$ 以上を示した高含水率の粒度分布においても、含水率の大小により区分をしたことにより推定誤差は $\pm 5\%$ 以内に収まり、測定精度が向上したといえる。以上より、本システムの含水率に応じた推定式の選択機能を用いることで、幅広い含水率の変動に対しても、精度良く粒度推定が可能であるといえる。

3.2 表面水量推定技術の精度検証

CSG 材 1 及び CSG 材 2 の含水率は、マイクロ波水分計を用いて連続的に測定する。マイクロ波水分計の測定精度が試料粒度の変動にどのような影響を受けるのかを把握するため、試料を最粗粒度付近と最細粒度付近に分類し、それぞれの粒度の表面水量を算出した。

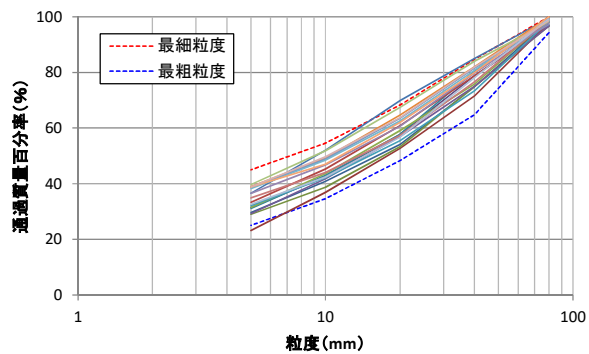


図-3.5 本検討に用いた段丘砂礫の通過質量百分率

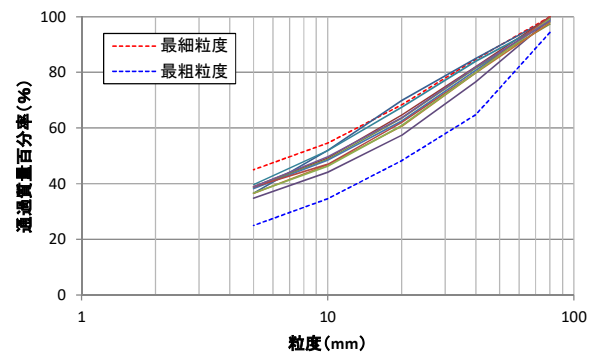


図-3.6 最細粒度付近段丘砂礫の通過質量百分率

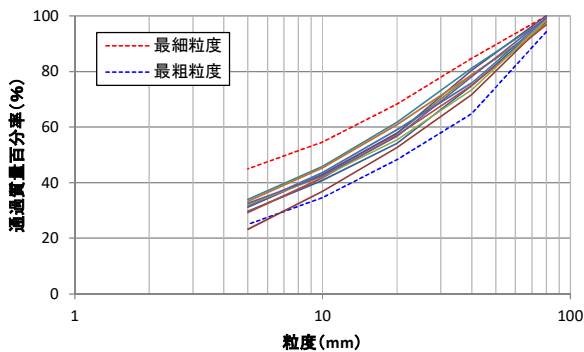


図-3.7 最粗粒度付近段丘砂礫の通過質量百分率

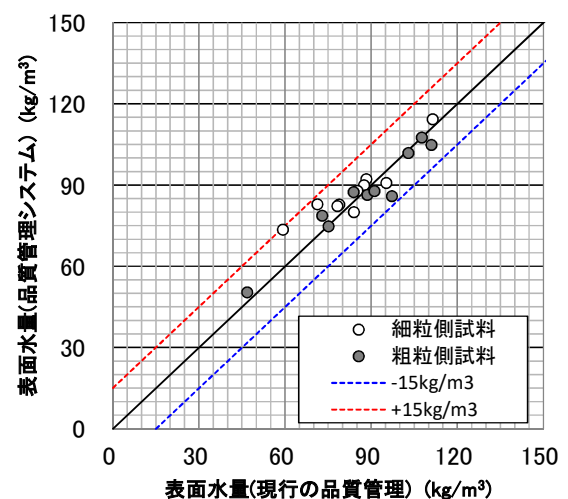


図-3.8 異なる方法で求めた表面水量の比較

(1) 検討試料

実運用での試験状況を考慮し、ベルコンで試料を搬送している状態をマイクロ波水分計で測定した。本検証に用いた CSG 材の通過質量百分率を図-3.5 に示す。図-3.5 にもみられるように粗粒が多い試料から細粒が多い試料まで、多様な粒度分布であった。この試料群から、細粒側材料の粒度分布を図-3.6、粗粒側材料の粒度分布を図-3.7 に示す。

(2) 検討結果

本検討に使用した試料の表面水量のシステムによる算出結果を図-3.8 に示す。細粒側材料および粗粒側材料のどちらの粒度であってもマイクロ波水分計と炉乾燥により求めた表面水量の誤差は $\pm 15 \text{ kg/m}^3$ 以内であり、良好な相関関係にあることが確認できた。以上より、本システムに使用するマイクロ波水分計は、試料粒度の変動に大きな影響を受けず表面水量の算出が可能であることを確認した。

4. 品質管理システムの試験的運用

4.1 品質管理システムによる施工当日の品質管理

表-4.1 に品質管理試験頻度に比較を示す。現行の日常品質管理試験は、煩雑な人力作業によるため、試験頻度

は 1 回/時間が限界である。そのため、製造量/時間が増加することで、きめ細かい CSG の品質管理が困難になる。一方で、本システムを適応することで、より多くの頻度で CSG 材の品質管理試験が可能となる。品質管理試験頻度を自由に設定することが可能であり、CSG の製造量に合わせて実施できるため、CSG の高速大量製造化に向けたきめ細かい品質管理が実現すると考えられる。

表-4.1 品質管理試験頻度の比較

計測方法	出荷量	管理頻度	
現行法	100(m ³ /h)	1回/時間	100(m ³ /h)
	200(m ³ /h)	1回/時間	200(m ³ /h)
品質管理システム	100(m ³ /h)	1回/30分	50(m ³ /h)
	200(m ³ /h)	1回/15分	50(m ³ /h)

4.2 泥岩による現場運用試験

品質管理システムで表面水量を測定した結果と従来通りの簡易法による日常管理試験結果を比較した。CSG 材 1 には、泥岩を用いて検証した。図-4.1 に本システムを試験運用して求めた表面水量を示す。簡易法において表面水量が大きいと計測された試料も、本システムは追従し

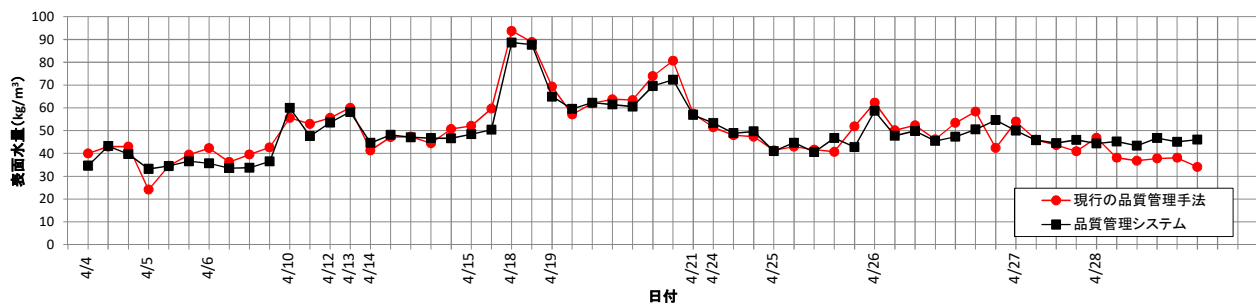


図-4.1 軟岩の表面水量経時変化の日常管理試験と品質管理システム

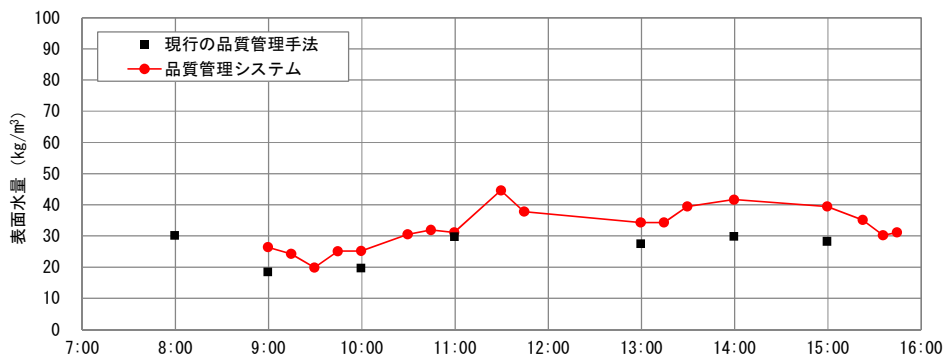


図-4.2 試験運用段階における品質管理システムによる表面水量測定結果（泥岩：1回/15分）

て算出することができている。経時変化によって連続的に変化する CSG 材の表面水量に対して、本システムは CSG 材表面水量の変動傾向を良好に表現できている。

4.3 本格運用へ向けた確認試験

本システムを本格運用させる際には、1 回/時間より多くの頻度で品質試験をすることが可能となる。そこで、例えば 1 回/15 分の頻度で本システムを稼働させて、この際の表面水量の経時変化を観察できることを確認した。比較となる簡易法での日常品質管理試験は、従来の方法に従い、人力での品質管理試験を 1 回/時間で実施した。

図-4.2 より、本システムで求めた表面水量は、簡易法による表面水量の変動傾向を良好に表現できている。また、これまで日常品質管理試験では把握することができなかった、1 時間の測定間における CSG 材の表面水量の変動も把握できていることが分かる。これにより、本システムを活用することで単位水量設定に向けての給水管理をきめ細かく実施できることを確認した。

5. まとめ

本研究では、室内試験および実プラントでの試験運用において、本システムの適用性を現行の日常品質管理試験結果と比較しながら検証した。

これにより、本システムが CSG 材の粒度分布および表面水量の変動傾向を良好に把握できることを確認した。また、現行の 1 回/時間の品質管理頻度に対して、1 回/15 分の高頻度で管理することも可能となるため、高速大量製造においても現行と同等レベル以上の品質管理を実現

することができる。また、本検証により、これまで煩雑であった人力による湿潤ふるい試験及び電子レンジ法による含水率測定を、本システムにより代替できると示唆された。

今後、本システムを本格運用しデータの蓄積およびシステムの改善を継続していく所存である。

謝辞：本報を執筆するにあたり、多大なご指導をいただきました（一財）ダム技術センターの皆様、発注者の皆様および作業所の皆様におかれましては、この場をお借りいたしまして感謝の意を評します。

参考文献

- 1) 笹倉ら：前田建設技術研究所所報 VOL 58. 2017
- 2) 日本建築学会編：建築学便覧Ⅱ構造、P.699, 1997
- 3) (財)ダム技術センター：台形 CSG ダム設計・施工・品質管理技術資料、2012