

# フィルダムコア盛立の新たな品質管理手法の検討

○坂本 博紀<sup>1</sup>・坂井田 輝<sup>2</sup>・田中 英晶<sup>3</sup>・有馬 慎一郎<sup>4</sup>

## 概要：

フィルダムのコアゾーンの締固めは、所要の乾燥密度と透水係数を確保するため、粒度、含水比、締固めエネルギー(CEL)を適切に管理して実施する必要がある。このため、実施工では材料採取・製造～盛立の各施工プロセスを規定するとともに抜き取り検査方式による品質管理試験を行っている。この際、含水比は現場締固め条件での最適含水比  $W_{opt}$  の乾燥側では透水係数が急増するため、 $W_{opt}$  から湿潤側に2～3%の範囲で管理するのが一般的で、 $W_{opt}$  はCELを1.0Ec(標準プロクター)とした室内締固め試験によって求める場合が多い。小石原川ダムでは、近年、大型化・高性能化した転圧機械による「現場の締固めエネルギー(F-CEL)」に対応した含水比の管理範囲を定めることなどにより、従来よりも合理的な締固め管理を目指している。また、ICT施工を利用した品質管理の合理化・高度化についても検討を行っているところである。

小石原川ダムでは飽和度とF-CELの要素を考慮するとともに、盛立試験から得られた盛土の変形係数と他の土質定数の関係性に着目した新たな品質管理手法を構築し、本体盛立工事に適用する予定である。本稿はそれらの検討結果についてとりまとめ、報告するものである。

キーワード：フィルダム、コア、盛土性能、品質管理、ICT施工

## 1. はじめに

フィルダムのコアゾーンの締固めは、所要の乾燥密度と透水係数を確保するため、粒度、含水比、締固めエネルギー(Compaction Energy Level, 以後CEL)を適切に管理して実施する必要がある。その際、含水比が現場締固め条件での最適含水比  $W_{opt}$  の乾燥側であると透水係数が急増するため、 $W_{opt}$  から湿潤側に2～3%の範囲で管理するのが一般的である。この場合、 $W_{opt}$  はCELを1.0Ec(標準プロクター)とした室内締固め試験によって求める場合が多い。一方、近年の転圧機種種の進歩に伴い現場の締固めエネルギー(Field-Compaction Energy Level, 以後F-CEL)が向上していることを考慮すると、 $W_{opt}$  の基準を1.0Ecとして含水比を設定するとF-CELの  $W_{opt}$  に対しては3%以上湿潤側の施工を許容していることになり合理性に欠ける面がある。また、品質管理に着目すると、一般土工ではGPS等のICTを活用した面的管理の適用が進んでいるが、これらの手法ではフィルダムコアゾーンの最も重要な性能である遮水性について適切な評価が行えないことから、抜き取り検査方式による品質管理から脱却できていない状況にある。

小石原川ダムでは、近年では転圧機械が大型化・高性能化していることから、F-CELに基づく含水比の管理範囲を

定めることで、従来よりも合理的な締固め管理を目指している(図-1参照)。本ダムでは、F-CELを含む複数の評価項目を総合的に評価することで、転圧後のコアの性能、施工性、将来的な品質管理合理化への拡張性に優れた転圧機種を選定した(盛立試験1と呼ぶ)。

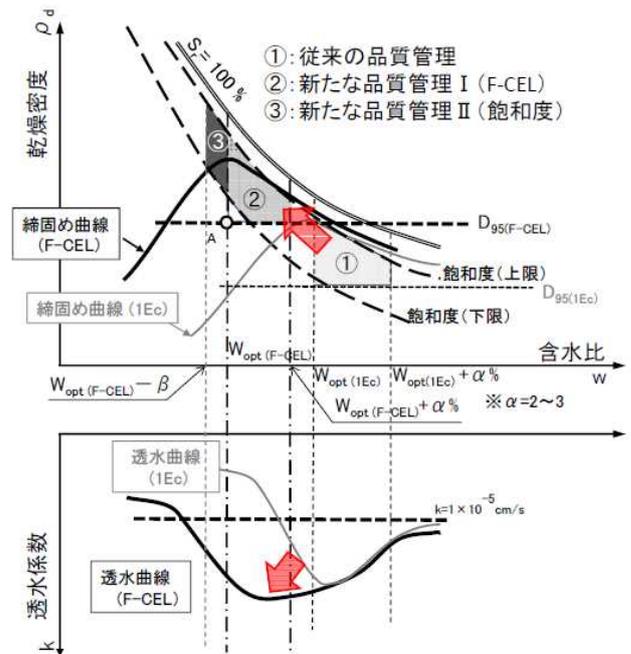


表-1 試験ケース一覧(盛立試験1,2)

- |                      |                   |
|----------------------|-------------------|
| 1. 朝倉総合事業所 ダム工事課 副参事 | 3. 朝倉総合事業所 ダム工事課長 |
| 2. 朝倉総合事業所 ダム工事課     | 4. 朝倉総合事業所 調査設計課長 |

また、盛立試験 1 で選定した転圧機種・転圧仕様のもと品質管理基準を満足する施工含水比の幅を確認した（盛立試験 2 と呼ぶ）。この際、一般的に評価対象としている透水係数、乾燥密度といった品質管理項目のほか、変形係数についての計測を行い、これらの関係性を確認するとともに、F-CEL に着目した整理を行うことで、締固め土の剛性に由来する指標を透水係数の品質管理に適用できる可能性、ひいては透水係数の面的管理を実現する可能性を見出した。

本ダムでは、上記に代表される盛立試験結果を総合的に整理し、F-CEL、飽和度、変形係数という従来は考慮されていなかった要素を勘案した新たな品質管理手法を構築し、本体盛立工事に適用する予定である。また、これら新たな品質管理手法を適用して、現時点では実現困難とされているコアゾーンの面的管理の実現を目標としている。本稿はこれらについての現時点の検討結果をとりまとめ、報告するものである。

## 2. 盛立試験 1

### 2.1 試験ケース

表-1 に盛立試験 1, 2 の全試験ケースを示す。盛立試験 1 では転圧機種および転圧回数を変化させた場合の①F-CEL、②乾燥密度、③透水係数、④飽和度、⑤密度の鉛直分布、⑥施工性について評価を行った。

転圧機種は、当初予定していた 19t 級振動タンピングローラと 10t 級平滑振動ローラの 2 機種とし、含水比は、転圧機種・転圧回数による F-CEL の影響が明確に現れるように、実施工においてストックパイルで通年の製造可能な含水比の下限値で設定し、 $W_{opt}(@1Ec) - 0.8\% (=14.3\%)$  で調整した。

### 2.2 試験材料

盛立試験の使用材料は強風化岩由来の礫混じり粘性土であり、細粒分含有率  $F_c$  値（粒径が 0.075mm 以下の材料の割合）が 55% 程度の細粒材と  $F_c$  値が 8% 程度の粗粒材を乾燥重量比 1:2.5 で混合した材料であり、Case1-1, 1-2 で用いた材料は全て同一のストックパイルから切崩し混

表-1 試験ケース一覧（盛立試験 1, 2）

	転圧機械	仕上り厚	転圧回数 N	施工含水比 $w^*$ (-37.5mm 粒度)
Case1-1	10t 級平滑振動ローラ	30cm	0,2,4,6,8,10,16	14.3%
Case1-2	19t 級振動タンピングローラ	30cm	0,4,6,8,10,16	14.3%
Case2-1	10t 級平滑振動ローラ	30cm	6,8	17.3%
Case2-2	10t 級平滑振動ローラ	30cm	6,8	15.6%
Case2-3	10t 級平滑振動ローラ	30cm	6,8	13.4%

\*  $w_{opt}(@1Ec) = 15.1\%$

合した材料である。転圧回数の異なる全てのケースで転圧前後の粒度分布（平均値）は同程度であり、転圧破碎の影響はほとんどないことを確認している。

## 2.3 試験結果

### 2.3.1 乾燥密度・透水係数・飽和度

突き砂法による現場密度試験（JGS1611）、現場透水試験（JGS1316）と室内突固め試験（JIS A 1210）、室内透水試験（JIS A 1218）の結果を図-2 に示す。現場密度試験は各転圧回数で 5 点実施しており、図-2 には平均値をプロットしている。また、現場試験では最大粒径  $D_{max} = 150\text{mm}$ 、室内試験では  $D_{max} = 37.5\text{mm}$  であり、現場試験では試験位置により礫率がばらつくことから、これらの影響を取り除いて同一粒度で比較するために、本稿における検討では、現場密度試験の結果を Walker-Holtz の礫率補正式によって  $D_{max} = 37.5\text{mm}$  試料の値に換算して、室内試験結果と比較している。図-2 より、Case1-1（10t 級平滑振動ローラ）は Case1-2（19t 級振動タンピングローラ）よりも同一の転圧回数の乾燥密度が高い値で推移しており、 $N=8$  付近で概ね収束している。透水係数  $k$  は Case1-1, 1-2 の全てのケースで品質管理基準 ( $k \leq 1.0 \times 10^{-5} \text{cm/sec}$ ) を下回るが、Case1-1 の方が半オーダー程度低い値に収束している。

### 2.3.2 F-CEL

F-CEL の評価結果を図-3 に示す。本ダムでは龍岡<sup>1)</sup>が提唱

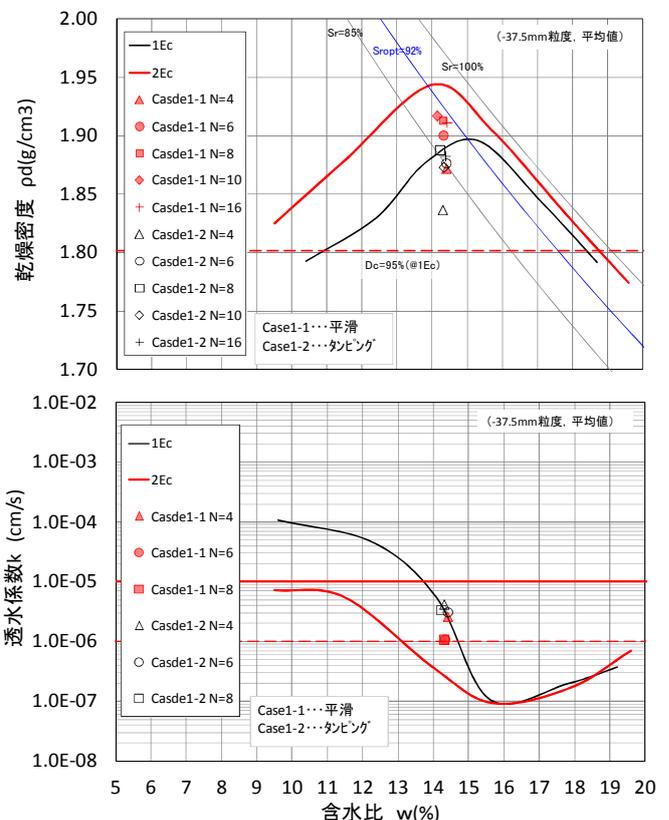


図-2 盛立試験 1 試験結果  
(乾燥密度、透水係数、飽和度)

する「乾燥密度-飽和度曲線は締固め度  $D_c$  と最適飽和度  $S_{r,opt}$  からの差分で正規化すると、CEL・材料の変化が限定的であれば概ね同一の曲線となる」という特徴に着目し、盛立試験1の結果に基づきF-CELの定量評価を行っている<sup>2)</sup>。

図-3より、F-CELは、19t級振動タンピングローラでは概ね1Ec付近に収束するのに対し、10t級平滑振動ローラでは転圧回数の増加に伴い1.8Ec付近まで上昇している。

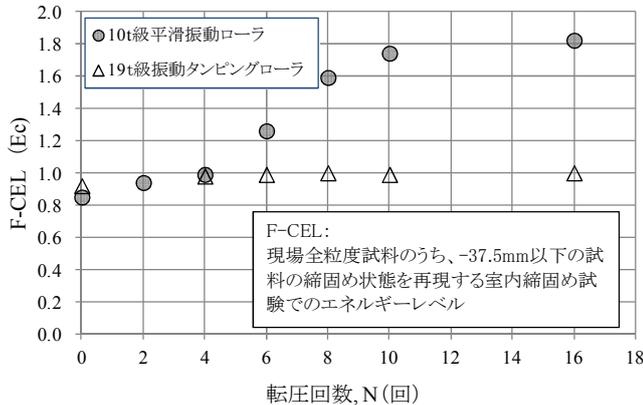


図-3 F-CEL と転圧回数の関係

### 2.3.3 密度の鉛直分布

本ダムではコアの仕上がり厚は30cm程度と従来よりも厚層施工で計画されていたため、転圧後のコアの締め固め状態が鉛直方向に大きな変化がないことを確認するため、3種類の手法で密度の鉛直分布を計測した<sup>3)</sup>。この結果、Case1-1, 1-2ともに鉛直分布の密度差は極めて小さいことから30cmの仕上がり厚での施工で問題ないことを確認した。

### 2.3.4 まとめ

現場試験結果および施工性について比較検討した結果、表-2に示すとおり、総合的に10t級平滑振動ローラが有利であると判断した。

## 3. 盛立試験2

### 3.1 試験ケース及び試験材料

表-1に示すとおり、盛立試験2における含水比は盛立試験1 (Case1-1, 2) を基準に、湿潤側含水比 (Case2-1)、中間含水比 (Case2-2)、乾燥側含水比 (Case2-3) で設定した。

### 3.2 試験材料

盛立試験2の試験材料は盛立試験1で使用した材料を含水比調整して再利用した。2.2に示したとおり、転圧破碎による粒度分布の変化はほとんどないことを確認しており、基本的な粒度特性は同一の材料による試験と考えられる。

### 3.3 試験結果

#### 3.3.1 乾燥密度・透水係数・飽和度

盛立試験1, 2の結果と室内試験の関係を図-4に示す。同一条件のCELで比較を行うため、転圧回数  $N=6, 8$  の結果のみを示す。全てのケースで乾燥密度  $\rho_d$  は品質管理基準を満足するが、透水係数  $k$  は最も乾燥側の含水比 ( $W=13.4\%$ ) となるCase2-3では品質管理基準 ( $k \leq 1.0 \times 10^{-5} \text{cm/sec}$ ) を満足していない。飽和度  $S_r$  に注目すると、Case2-3の平均値は82%程度で低い孔では80%を下回るのに対し、透水係数の品質管理基準を満足するCase1-1, 2-1, 2-3では全ての孔が85%以上の範囲に分布する。これらより、本ダムにおける含水比  $W$  の管理範囲は  $W_{opt} (@1Ec) - 0.8\% \leq W \leq W_{opt} (@1Ec) + 2.2\%$  とし、飽和度の管理下限値は85%とした。

#### 3.3.2 変形係数

##### (1) 変形係数-透水係数

変形係数  $E$  と透水係数  $k$  の関係を図-5に示す。変形係数の計測は落球探査法により実施した<sup>4)</sup>。図-5より、透水係

表-2 転圧機械選定\_比較

	Case1-1 (10t平滑振動ローラ)		Case1-2 (19t振動タンピングローラ)	
乾燥密度	・設計値(1.73g/cm <sup>3</sup> )、 $D_c=95\%(@1Ec)$ (1.80g/cm <sup>3</sup> )を満足する。	◎	・設計値(1.73g/cm <sup>3</sup> )、 $D_c=95\%(@1Ec)$ (1.80g/cm <sup>3</sup> )を満足する。	○
透水係数	・設計値(1.0×10 <sup>-5</sup> cm/sec)を満足する。 ・ $N \geq 6$ での平均値は1.1×10 <sup>-6</sup> cm/s。(タンピングの約1/3)	◎	・設計値(1.0×10 <sup>-5</sup> cm/sec)を満足する。 ・ $N \geq 6$ での平均値は3.1×10 <sup>-6</sup> cm/s。	○
F-CEL	・ $N = 6$ 回で1.3Ec ・ $N \geq 8$ 回で1.5Ec以上	◎	・ $N \geq 4$ 回で1.0Ec	○
密度の鉛直分布	(1) 乾燥密度 (水置換法) ・上層の乾燥密度に対する下層の締固め度は99.4%~100.2% (2) 湿潤密度 (X線CT分析、2孔式RI) ・湿潤密度の鉛直分布は概ね一定	◎	(1) 乾燥密度 (水置換法) ・上層の乾燥密度に対する下層の締固め度は98.5%~99.5% (2) 湿潤密度 (X線CT分析) ・湿潤密度の鉛直分布は概ね一定	◎
施工性	(1) ウェーピングの有無 ・ウェーピング現象は確認されない。 (2) 品質管理試験 ・仕上がり面が平滑であるため、各種試験の実施は容易。 ・落球探査法は適用可能。 (3) その他 ・降雨前処理のためのフラット転圧がほぼ不要。 ・CCVに代表される面的管理型の品質管理への発展性がある。	◎	(1) ウェーピングの有無 ・ウェーピング現象は確認されない。 (2) 品質管理試験 ・試験前に、転圧面の凹凸処理が必要。 ・落球探査法は適用不可。(凹凸処理の影響を受けるため) (3) その他 ・降雨前処理のためのフラット転圧が必要。 ・CCVの適用は不可。	○
評価結果	◎		○	

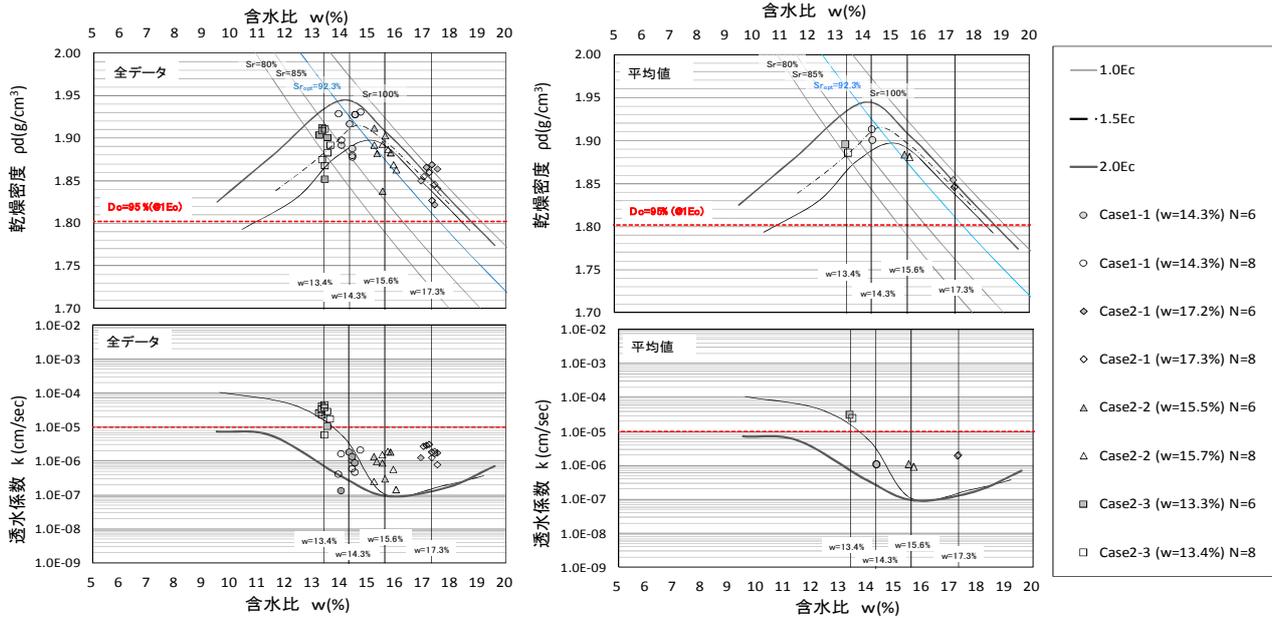


図-4 盛立試験と室内試験の関係 (乾燥密度, 透水係数, 飽和度)

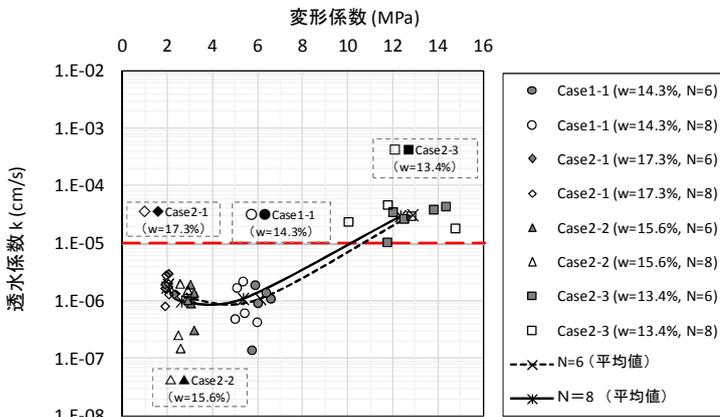


図-5 変形係数と透水係数の関係

数が品質管理基準を満足する範囲では、変形係数が8MPaより小さい範囲に分布している。また、転圧回数N=6, 8でCELを固定して平均値で整理するとE-kの関係は1本の曲線が描け、透水係数が最小となる極値を持つことが分かる。

(2) 変形係数と突固め曲線の関係

変形係数Eを含む各種の土質定数について施工仕様の転圧回数(N=8)を抽出して再整理した結果を図-6に示す。CELが一定の条件下ではEは透水係数kと同様に含水比とも高い相関があることが分かる。図-6より、kが管理基準値(1.0×10<sup>-5</sup>cm/sec)以下の範囲ではEは概ね10MPa以下の範囲で推移すると推定される。含水比の管理範囲内(図-6で直線1, 2で挟まれる範囲)ではEは平均値で2~6MPa、kは平均値で1.0~2.0×10<sup>-6</sup>cm/secで推移している。これらの関係から、転圧後の変形係数が平均値(5点を想定)でE≤6.0MPaであることを確認することで、透水係数が管理基準値よりも十分小さいことを間接的に確認できると考えられる。

(3) 品質管理基準への適用性

盛立試験1, 2の結果から変形係数Eは他の土質定数と高

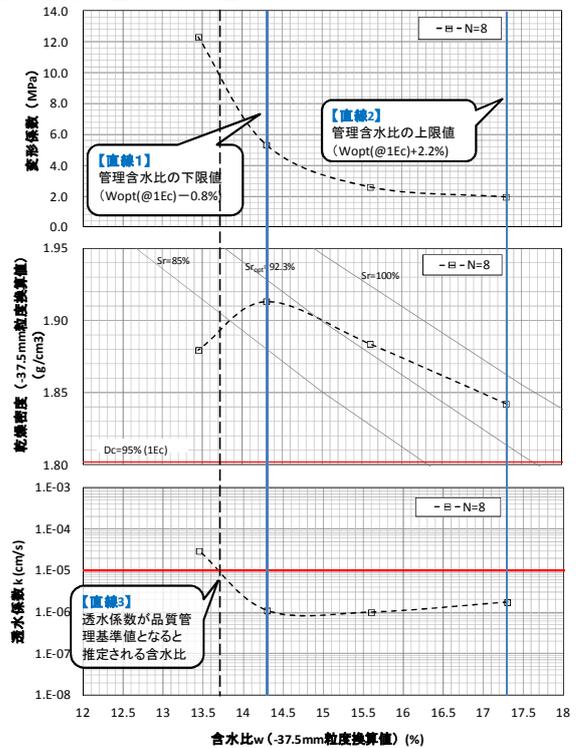


図-6 変形係数と突固め・透水曲線

い相関が確認された。今後は、実施工でのデータを蓄積し、材料(粒度)のバラつきの影響も含めた再評価を行い、透水係数を評価するための代替指標となり得るかについて検討を進める予定である。

3.4 管理範囲

盛立試験結果から設定した本ダムの品質管理基準を満足するための含水比、飽和度、乾燥密度の管理範囲(案)を図-7に示す。F-CELを考慮することで従来よりも管理含水比の範囲を乾燥側に設定したこと、飽和度の下限値を設定したこと、管理範囲の重心は左上にシフトしている。

これは平均的な締固め後の乾燥密度が高い範囲にあることを意味しており、従来よりも高い盛土性能が確保できることが分かる。

また、図-7には本ダムにおける管理目標点を示している。管理範囲の湿潤側では突固め曲線は1~1.5EcでCELの上昇に対する密度上昇が小さくF-CELが有効活用されないため、F-CELの有効活用の観点から $W_{opt}(@1Ec)$ とF-CEL(=1.5Ec)の突固め曲線の交点を目標点として設定した。目標点は $W_{opt}(@1.5Ec)$ よりもやや湿潤側にあり、遮水性の観点から見た場合にも適切な含水比であると考えられる。

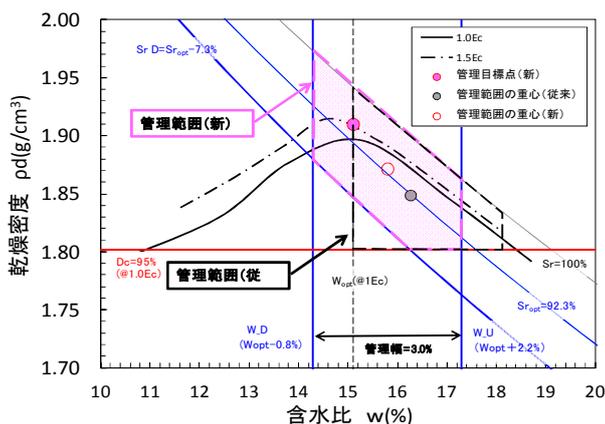


図-7 含水比・乾燥密度・飽和度の管理範囲

#### 4. 将来的な品質管理の合理化・高度化への取組

一般土工ではTS/GNSSを利用した盛土施工の面的管理の適用が進んでいる。フィルダムコアゾーンにおける品質管理においてTS/GNSS管理が即座に適用出来ないのは、コアゾーンでは一般土工で要求される「強度」、「乾燥密度」に加えて「遮水性」が求められ、「遮水性」の評価は密度だけでは困難なためである。小石原川ダムでは、コアの品質管理を全量管理化することを目標として下記の取組を行う。

##### 4.1 「粒度、含水比、CEL」の全量管理化への取組

転圧後の盛土性能(乾燥密度、透水係数)は「粒度、含水比、CEL」により規定されることから、フィルダムの施工ではこれらを均一化するための施工努力がなされ、施工過程において品質管理試験を行い管理している。本ダムでは、従来の抜き取り検査型の「粒度、含水比」と施工仕様規定型「CEL」の品質管理をICT施工により全量管理に近づける。「粒度」についてはデジタルカメラ画像による粒度判別手法<sup>5)</sup>、「含水比」については近赤外線計測によるICT管理を想定している。全量に近い頻度で「粒度、含水比、CEL」が一定の幅に収まることを確認することで、間接的に全エリアの締固め後の盛土性能が品質管理基準範囲に入ることを担保していく予定である。「粒度、含水比、CEL」の全量管

理化による品質の均一化のイメージを図-8に示す。

##### 4.2 転圧後の性能確認の全量管理化への取組

「乾燥密度」の全量管理は、一般土工と同様に事前の盛立試験結果に基づくTS/GNSS管理(転圧回数管理)で問題ないと考えられる。本ダムでは「粒度」「含水比」についてもICT施工を駆使して全量管理に近づけるため、一般土工のTS/GNSS管理よりも高い精度で管理することが可能になると考えている。

「透水係数」の管理についてはCCV値<sup>6)</sup>に代表される転圧機に設置した加速度計を用いた盛立面の剛性評価を行う指標を用いて評価を行う予定である。

盛立試験におけるCCV値と変形係数を図-9に示す。Case1-1, 2-1, 2-2では乾燥密度 $\rho_d$ 、透水係数 $k$ は品質管理基準を満足するが、図-9に示すCCV値はCase2-1, 2-2ではほとんど変化していない。一般的なCCV管理に倣い、 $\rho_d$ 、 $k$ の管理基準を満足するCCV値の下限値を設定して品質管理をしようとした場合、含水比が低い場合は敷き均しが完了した段階で設定した下限値を上回るケースが存在することになる。このため、下限値管理を適用することは適切ではない。

ここで3.3に示した変形係数と透水係数の関係性に注目すると新しい視点が生まれる。フィルダムコアゾーンに使用されるような遮水材料では、「粒度、含水比、CEL」を一

<b>【粒度分布】</b>
(従 来) SP造成時、搬出時の管理試験 (JIS法: 1回/日)
(本ダム) 搬出時の管理試験 (JIS法: 1回/日) + 画像粒度モニタリング (1回/hr程度)
<b>【含水比】</b>
(従 来) 搬出時の管理試験 (JIS法: 3回/日)
(本ダム) 搬出時の管理試験 (JIS法: 1回/日) + 近赤外線水分量計測 (全量)
<b>【CEL】</b>
(従 来) 施工規定 (撤き出し厚、転圧回数、転圧機種)
(本ダム) 施工規定+ICTによる全量管理 (撤き出し厚、転圧回数、レーン)

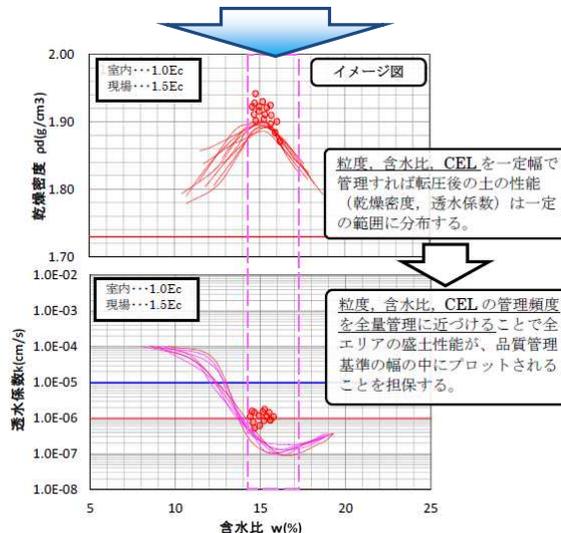


図-8 粒度・含水比・CEL管理高度化のイメージ

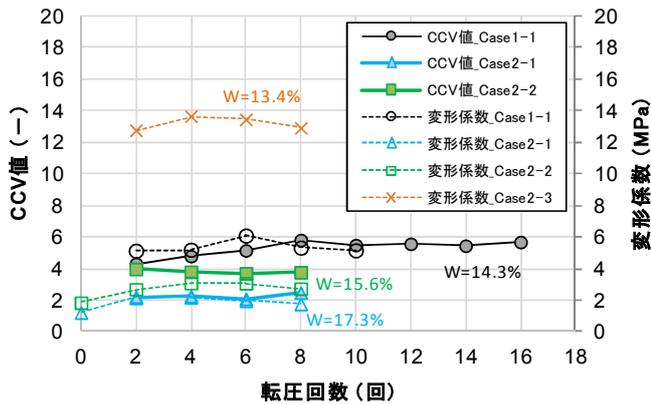


図-9 含水比と CCV 値・変形係数の関係

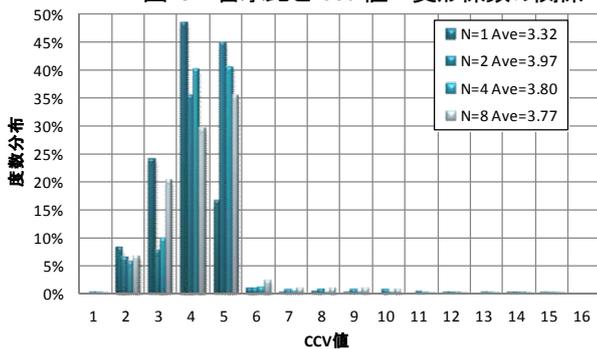


図-11 CCV 値の度数分布 (Case2-2)

定の範囲で管理された条件下においては「転圧後の間隙が十分小さくなった状態において、変形係数が一定値よりも下回っている」ことを確認すれば、透水係数が品質管理基準を満足していることを間接的に確認できる」ことに注目すれば、CCV 値等の指標も土の剛性に依存した指標であることから同様の傾向が確認されると考えられる。図-9 より、含水比が同一の条件下では、転圧回数に応じた CCV 値と変形係数の変化傾向が良く似ていることが分かる。CCV 値、変形係数の相関と図-6 に示す管理含水比幅と  $E$ ,  $\rho$ ,  $d$ ,  $k$  の関係から、透水係数の品質管理基準を満足すると想定される CCV 値の範囲を図-10 に示す。CCV 値が 2.0~6.5 の範囲であれば透水係数は管理基準値を満足するものと想定している。

管理目標点の含水比 ( $W_{opt}(@1Ec)$ ) に最も近い Case2-2 ( $W_{opt}(@1Ec) + 0.5\%$ ) の CCV 値の度数分布を図-11 に示す。今回の盛立試験では CCV システムは GPS との同期を行っていないため、転圧面における平面分布図は作成していないが、図-11 より、計測値の大部分が想定する CCV 値の管理基準値 (2.0~6.5) に収まっていることから、転圧面全体としての遮水性は問題ないものと推定される。品質管理基準へ適用するにあたっては、転圧面を単位面積ごとの計測値でマッピングし、基準値を満足する面積についての合格率を定めて管理するなどの考え方を整理する必要がある。

今後、追加の盛立試験および実施工において CCV 値と変形係数、粒度、乾燥密度、透水係数、含水比等の土質定数の関係や材料のバラつきによる影響評価を行い、CCV 値の管理上限値を設定することで、透水係数の面的管理が可能と

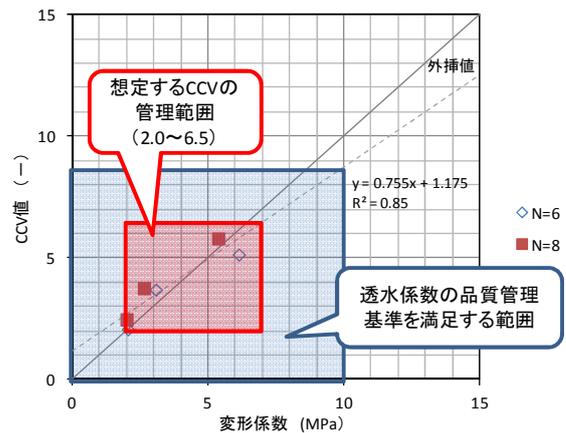


図-10 想定する CCV の管理範囲

なる可能性は十分にあると考えられる。

## 5. 結論

フィルダムコアゾーンの品質管理の高度化・合理化を目標とした盛立試験計画を立案し、これらの結果に基づき当初計画よりも盛土性能・施工性・拡張性の面で有利な転圧機種を選定するとともに、従来よりも合理的な品質管理手法を構築した。また、従来の管理項目にはない変形係数と透水係数の関係に着目することで、転圧後のコアの遮水性を迅速評価やこれまで不可能と考えられていたコアゾーンにおける透水係数の全量管理を実現できる可能性を見出すことが出来た。

今後はコアゾーンにおける面的管理を実現すべく、追加の盛立試験及び盛立前期における実施工におけるデータを蓄積・整理を行い、実現可能と考えられる整理が出来た段階で有識者の意見も踏まえ、盛立工において実施工への適用を進めていきたい。

## 参考文献

- 1) 龍岡文夫. 2016. 土の締固めにおける飽和度管理の重要性. ダム技術 No354. p. 3-16. 3月号
- 2) 坂本博紀, 曾田英揮, 小林弘明, 龍岡文夫. 2017. フィルダムのコアゾーンにおける締固め状態の評価事例. 土木学会第 72 回年次講演
- 3) 坂本博紀, 有馬慎一郎, 小林弘明, 小原隆. 2017. フィルダムコアゾーンにおける密度鉛直分布の計測事例. 土木学会第 72 回年次講演
- 4) 辻良祐, 藤崎勝利, 吉田輝, 小林弘明, 小原隆, 坂本博紀. 2017. 変形係数と飽和度に着目した締固め管理手法の提案. 土木学会第 72 回年次講演
- 5) 藤崎勝利, 黒沼出, 川野健一, 武井昭. 2013. デジタルカメラ画像を用いた CSG 材の粒度変動監視システム. ダム工学 23(1). p. 19-26
- 6) 公益社団法人地盤工学会. 2012. 土の締固め. p. 43-54