

留萌ダム粗粒材の堤体における品質管理結果

Quality Control Results of Rumoi Dam

中川 侑大^{※1}
Yukihiro Nakagawa
西元 守人^{※1}
Morito Nishimoto

山上 雅弘^{※1}
Masahiro Yamagami
沼田 淳紀^{※2}
Atsunori Numata

山岸 保^{※1}
Tamotsu Yamagishi
本山 寛^{※3}
Hiroshi Motoyama

【要旨】

留萌ダムでは、平成16年5月25日に堤体の遮水ゾーン（一般コア）の盛立を開始し、平成19年8月31日に最終層の盛立を完了した。堤体の盛立完了にともない品質管理結果を取りまとめ、ここでは堤体盛立場における粗粒材（ロック、トランジション、フィルター）の品質管理結果について報告する。

【キーワード】 留萌ダム、ロックフィルダム、品質管理、粗粒材、材料選別

1. はじめに

留萌ダムは中央コア型ロックフィルダムで、堤体は図-1に示すとおりゾーニングされている。コアは主として遮水機能を有し、ロックは力学的安定性が必要とされる。

フィルターはコアとロックの間で盛立材料の性質の急変を避け、応力の伝達と変形の影響を緩和する役割を有する。トランジションはロックより低品質の材料を廃棄することなく有効利用する為にゾーニングされている。

ここでは、堤体盛立場における粗粒材料（ロック、トランジション、フィルター）の品質管理結果について報告する。

2. 留萌ダムの概要

北海道の北西部、札幌と稚内のほぼ中央に位置する留萌市を流れる留萌川は、天塩山地を水源として日本海に注ぐ、流域面積 270km²、幹線流路長約 44km の一級河川である。留萌ダムは、この留萌川水系チバベリ川に建設され、洪水調整、流水の正常な機能維持、留萌市への水道用水の補給を目的とした多目的ダムである。

図-1に留萌ダムの堤体標準断面図を、表-1に工事概要を示す。ダム形式は中央コア型ロックフィルダムである。

このダムの大きな特徴は、ダムサイトの沖積地盤を約 15m 掘込んで堤体を盛立てているため、堤体部の約半分が地盤内にあり、堤体の上下流側両側に約 15m の埋戻し層があること、堤体下流側は建設発生土処理として腹付け盛土が配置されていることである。

表-1 工事概要

工事名	留萌ダム建設事業の内 堤体建設第1期工事 留萌ダム建設事業の内 堤体建設第2期工事
工事場所	北海道留萌市幌糠町字チバベリ
発注者	国土交通省 北海道開発局 留萌開発建設部
施工者	飛島・鉄建・岩田特定建設工事共同企業体
工期	自 平成14年2月22日～至 平成18年3月20日 1期工事 自 平成17年8月5日～至 平成21年12月17日 2期工事
ダム形式	中央コア型ロックフィルダム
堤高	41.2 m
堤頂長	440.0 m
堤体積	1,225千m ³
湛水面積	2.2 km ²
総貯水容量	23,300千m ³

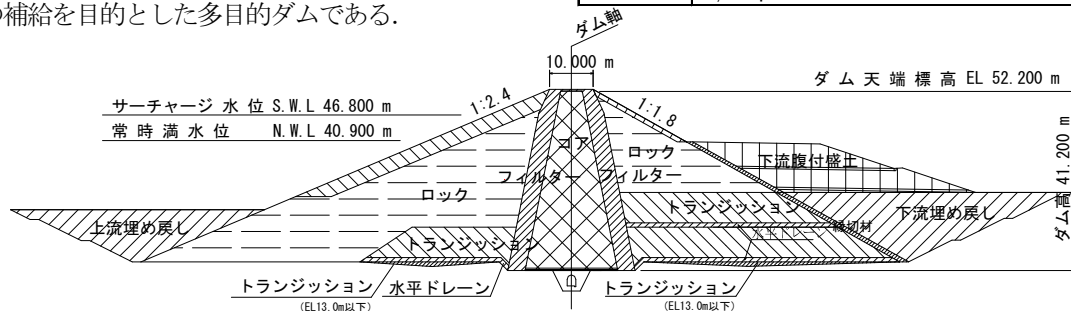


図-1 留萌ダム堤体標準断面図

※1 札幌事業部 留萌ダム作業所 ※2 技術研究所 第2研究室 ※3 技術研究室 第1研究室

また、施工上の特徴として、冬季間豪雪の影響で盛立作業が休止となることが挙げられる。各年度の盛立期間は、平成16年度は5/25～9/19、平成17年度は6/3～10/31、平成18年度は5/13～10/20、平成19年度は4/30～8/31の期間であり、一年の内残りの半年以上が盛立休止期間である。

3. 品質管理試験

留萌ダムの盛立場における粗粒材の品質管理試験項目および品質管理基準値を表-2に示す。

4. ロックの品質管理試験結果

4.1 粒度分布

図-2に堤体盛立場におけるロックの粒度組成を示す。図中には、各年度の粒度組成範囲と平均値を示した。

各年度の通過質量百分率の平均値は、差が大きなところでも10%程度であり、また、各年度の粒度組成範囲の差も小さく、堤体全体が安定した粒度組成の材料で盛立てられたといえる。

ロックの品質管理基準値である最大粒径 $D_{max} \leq 600 \sim 700\text{mm}$ (目安)、および細粒分含有率 $F_c \leq 5\%$ はいずれも満足されている。

4.2 ヒストグラム (度数分布)

(1) 乾燥密度 ρ_d

図-3に水置換法による土の密度試験 (JGS 1612 に準拠) により得られた堤体盛立場における乾燥密度のヒストグラムを示す。グラフにおいて、例えば横軸の1.85の項目は $1.80 \leq x < 1.85$ のデータの頻度を表している。また、正規分布曲線を図中に実線で併記した。なお、以降のヒストグラムについても同様である。

乾燥密度は品質管理基準値 $\rho_d \geq 1.8\text{t/m}^3$ を全て満足する結果が得られた。乾燥密度の大半は $\rho_d = 1.95\text{t/m}^3$ 以上で、平均値も 2.01t/m^3 となり、全般的に高い乾燥密度となった。

(2) 合成絶対乾比重 G_b

図-4に合成絶対乾比重 G_b のヒストグラムを示す。

ロックの合成比重は、63mm以上、63～37.5mm、37.5～19.0mm、19.0～4.75mm、4.75mm以下の合成比重であり、式(1)より求めた。¹⁾ただし、4.75mm以下の比重は土粒子の密度試験より求めた。

$$\bar{G}_b = \frac{\sum W_s}{\sum V_s} = \frac{1}{\frac{1}{100} \sum \frac{P_i}{G_{bi}}} \quad (1)$$

ここで、 \bar{G}_b : 合成絶対乾比重

表-2 品質管理試験項目および品質管理基準値

材料	場所	試験項目	試験仕様	品質管理基準値	品質管理試験実施頻度	
ロック	盛立場	土粒子の密度	JIS A 1202	-4.75mm	-	1回/30,000m ³ 3点/1回
		粒度	JIS A 1204	ふるい	$D_{max}=600 \sim 700\text{mm}$ (目安) $F_c \leq 5\%$	1回/30,000m ³ 3点/1回
		骨材の密度及び吸水率	JIS A 1110	4.75～19mm、19～37.5mm、37.5～63mm、+63mm	$G_b \geq 2.5$ $Q \leq 5\%$	1回/30,000m ³ 3点/1回
		現場密度	JGS 1612	水置換法 (φ120cm、H120cm)	$\rho_d \geq 1.80\text{t/m}^3$ ($e_s \leq 0.37$)	1回/30,000m ³ 3点/1回
		現場透水		麥水位法 (φ120cm、H120cm)	$k \geq 1.0 \times 10^{-5}\text{cm/s}$	1回/30,000m ³ 3点/1回
		コンクリート	盛立場	土粒子の密度	JIS A 1202	-4.75mm
粒度	JIS A 1204			ふるい	$D_{max}=300 \sim 400\text{mm}$ (目安) $F_c \leq 10\%$	1回/30,000m ³ 3点/1回
骨材の密度及び吸水率	JIS A 1110			4.75～19mm、19～37.5mm、37.5～63mm、+63mm	$G_b \geq 2.2$ $Q \leq 10\%$	1回/30,000m ³ 3点/1回
現場密度	JGS 1612			水置換法 (φ100cm、H60cm)	$\rho_d \geq 1.86\text{t/m}^3$ ($e_s \leq 0.39$)	1回/30,000m ³ 3点/1回
現場透水				麥水位法 (φ100cm、H60cm)	$k \geq 1.0 \times 10^{-5}\text{cm/s}$	1回/30,000m ³ 3点/1回
フィルター	盛立場			土粒子の密度	JIS A 1202	-4.75mm
		骨材の密度及び吸水率	JIS A 1110	4.75～19mm、19～37.5mm、37.5～63mm、+63mm	$G_b \geq 2.5$ $Q \leq 5\%$	1回/3層 3点/1回
		粒度	JIS A 1204	ふるい	$D_{max}=150\text{mm}$ $40\% \leq P_{150\text{mm}} \leq 75\%$ $D_{15} \leq 0.7\text{mm}$ $F_c \leq 5\%$	1回/1層 1点/1回 1回/3層 3点/1回 (現場密度試験孔)
		現場密度	JGS 1612	水置換法	$\rho_d \geq 2.0\text{t/m}^3$	1回/3層 3点/1回
		現場透水		麥水位法	$k \geq 1.0 \times 10^{-4}\text{cm/s}$	1回/3層 3点/1回

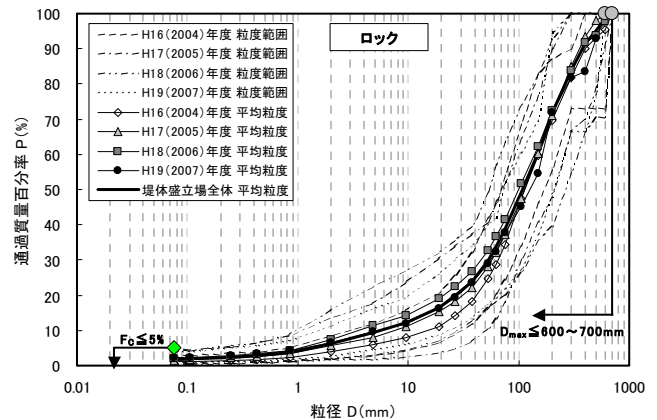


図-2 ロックの粒度組成

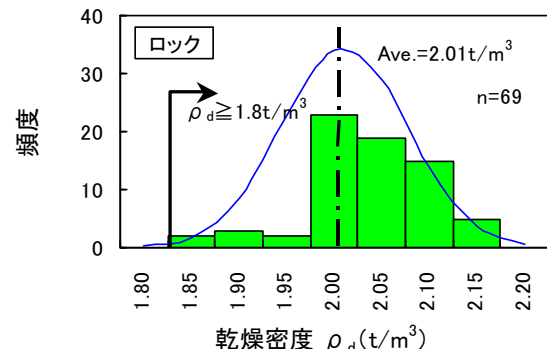


図-3 ロック乾燥密度 ρ_d のヒストグラム

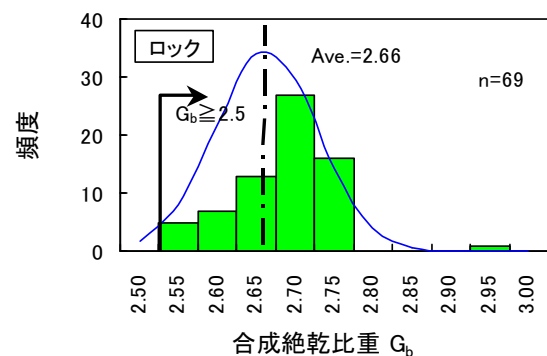


図-4 ロック合成絶対乾比重 G_b のヒストグラム

P_i : 各粒度階における残留率 (%)

G_{bi} : 各粒度階における絶乾比重

得られた合成絶乾比重は、品質管理基準値 $G_b \geq 2.5$ を全て満足し、平均値は2.66であった。ロックは主に玄武岩である。玄武岩の一般的な絶乾比重2.2~2.8と比較しても、ほぼ平均的な値と一致している。²⁾

(3) 合成吸水率 Q

図-5に合成吸水率のヒストグラムを示す。合成吸水率は合成絶乾比重と同様に、粒径 63mm 以上, 63~37.5mm, 37.5~19.0mm, 19.0~4.75mm, 4.75mm 以下の合成であり、式 (2) より求めた。¹⁾

$$\bar{Q} = \sum (P_{si} \cdot Q_i) \quad (2)$$

ここで、 \bar{Q} : 合成吸水率 (%)

Q_i : 各粒度階における吸水率 (%)

得られた吸水率は、品質管理基準 $Q \leq 5\%$ を満足している。平均値は2.3%となった。

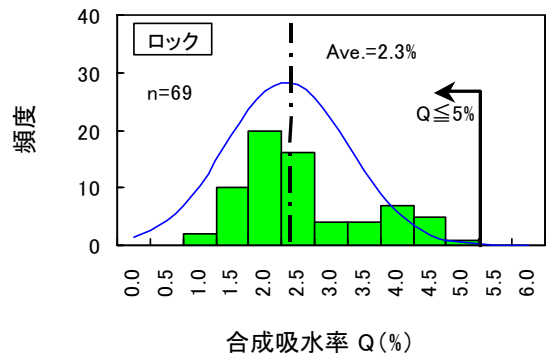


図-5 ロック合成吸水率Qのヒストグラム

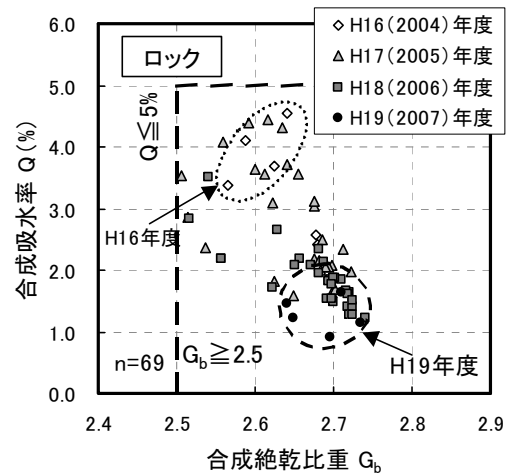


図-6 合成吸水率Q—合成絶乾比重 G_b

4.3 合成絶乾比重との相関関係

(1) 合成絶乾比重と合成吸水率の関係

ロックには耐久性が要求される。一般に岩石は比重が大きく、かつ、吸水量が小さいほど堅硬である。

図-6に合成絶乾比重と合成吸水率の関係を示す。

盛立の年度ごとに記号を変えた。グラフ中の破線で示した直線は品質管理基準値を表している。年度ごとのデータに着目すると、盛立を開始したH16年度はプロットが左上付近に分布し、盛立(年度)が進むにつれて、プロットはグラフの右下方向に分布が推移し、H19年度は右下に固まり堅硬になっていることがわかる。これは、盛立の進捗こともない、原石山における材料採取深度が深くなり、堅硬なロック材料が採取されたためだと考えられる。

(2) 合成絶乾比重と乾燥密度の関係

図-7に全粒径の合成絶乾比重と乾燥密度の関係を示す。合成比重 G_b が大きいほど、乾燥密度 ρ_d も大きくなる傾向があることがわかる。これは、礫の比重が大きくなるのでそれに合わせて質量も大きくなり密度が大きくなるからである。

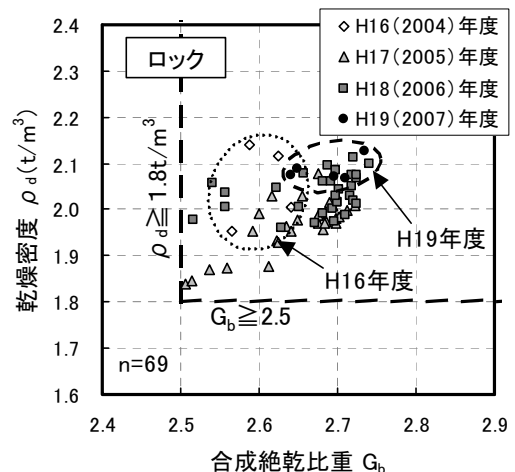


図-7 乾燥密度 ρ_d —合成絶乾比重 G_b

4.4 圧密排水三軸圧縮試験結果

表-3に圧密排水条件による大型三軸圧縮試験より得られたせん断抵抗角を示す。せん断抵抗角はいずれも品

表-3 ロックせん断抵抗角 ϕ_d

年度	せん断抵抗角 ϕ_d (deg)	
	品質管理基準値	品質管理試験結果
H16(2004)	41	42.9
H17(2005)		41.6
H18(2006)		41.3
H19(2007)		42.4

質管理基準値 $\phi_d \geq 41 \text{deg}$ を満足し、特に H16 年度と H19 年度の値が大きくなっている。

4.5 深度分布

(1) 乾燥密度 ρ_d

図-8 (a) に乾燥密度 ρ_d の深度方向分布を示す。図中には、標高ごとの平均値を実線で示した。

乾燥密度は、盛立初期の盛立標高 EL=20m 付近でやや大きな値を示し、一度 20~30m 付近で小さくなるが、その後盛立標高が上がるにしたがい大きくなる傾向が認められる。

(2) せん断抵抗角 ϕ_d

図-8 (b) にせん断抵抗角の深度分布を示す。

盛立標高が低い部分と高い部分でせん断抵抗角が大きくなっていることがわかる。ロックの三軸圧縮試験用の供試体は、原石山で採取したロックを用いて、堤体盛立場におけるロックの平均の相似粒度および平均の間隙比となるように作製し品質管理試験が行われた。したがって、求められたせん断抵抗角は、堤体ロックゾーンのせん断抵抗角を示すものと考えられる。

盛立初期は、図-6 に示すように合成絶対比重が小さく吸水率が大きな材料が盛立てられ、盛立とともに堅硬な材料へ移行した。しかし、この傾向とせん断抵抗角の傾向は一致せず、乾燥密度との相関が高く、せん断抵抗角が乾燥密度に強く支配されていることがわかる。

5. トランジションの品質管理結果

5.1 粒度分布

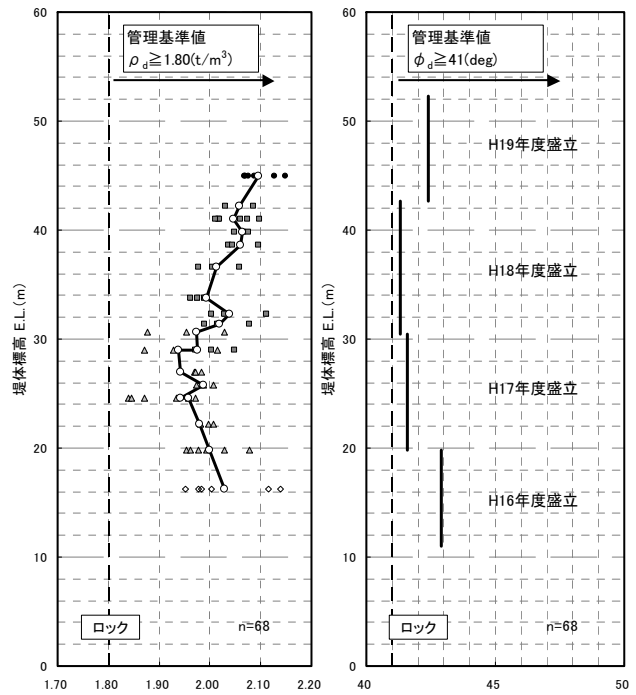
図-9 に堤体盛立場におけるトランジションの粒度組成を示す。図中には、各年度の粒度組成範囲と平均値を示した。トランジションは H16, H17 年度に盛立を行っている。H16 年度と H17 年度の平均値に差はほとんどなく、安定した粒度組成の材料で盛立てられたといえる。トランジションの品質管理基準値である最大粒径 $D_{\max} \leq 300 \sim 400 \text{mm}$ 、および細粒分含有率 $F_c \leq 10\%$ はいずれも満足されている。

5.2 ヒストグラム (度数分布)

(1) 乾燥密度 ρ_d

図-10 に堤体盛立場におけるトランジションの乾燥密度のヒストグラムを示す。

乾燥密度の品質管理基準値 $\rho_d \geq 1.86 \text{t/m}^3$ を全て満足する結果が得られた。乾燥密度は $\rho_d = 2.00 \sim 2.15 \text{t/m}^3$ の範囲で頻度が多く、平均値は 2.02t/m^3 となり、全般的に高い乾燥密度になった。



(a) 乾燥密度 ρ_d (b) せん断抵抗角 ϕ_d

図-8 ロック深度方向分布

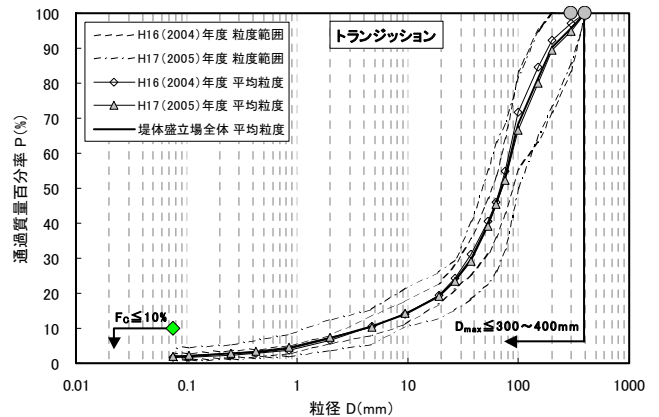


図-9 トランジションの粒度組成

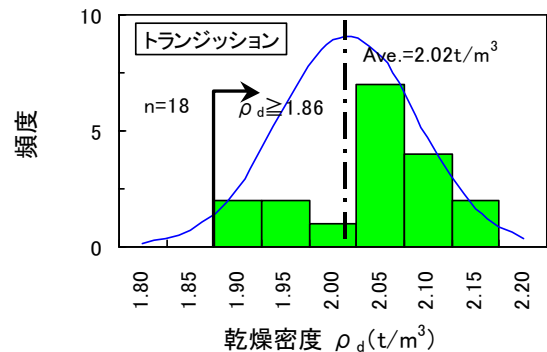


図-10 トランジション乾燥密度 ρ_d ヒストグラム

(2) 合成絶乾比重 G_b

図-11 に合成絶乾比重のヒストグラムを示す。トランジションの合成比重は、ロックと同様に全粒径の合成比重である。合成絶乾比重は、品質管理基準値 $G_b \geq 2.2$ を全て満足し、平均値は2.5であった。合成絶乾比重は $G_b = 2.45 \sim 2.70$ の範囲にあり、一般的に高い合成絶乾比重になった。

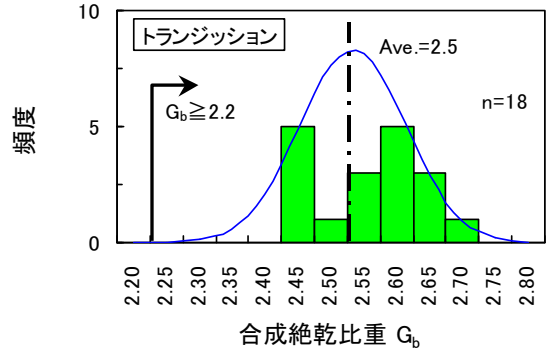


図-11 トランジション合成絶乾比重 G_b ヒストグラム

(3) 合成吸水率 Q

図-12 に合成吸水率のヒストグラムを示す。ロックの合成絶乾比重と同様に、合成吸水率は全粒径の合成である。吸水率は品質管理基準値 $Q \leq 10\%$ を満足している。平均値は6%となった。

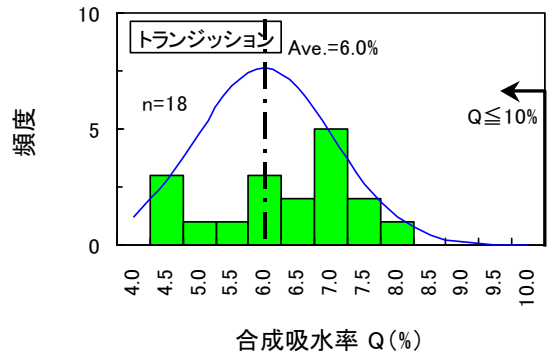


図-12 トランジション合成吸水率 Q ヒストグラム

5.3 合成絶乾比重との相関関係

(1) 合成絶乾比重と合成吸水率の関係

図-13 に合成絶乾比重と吸水率の関係を示す。

年度ごとのデータに着目すると、H16年度はグラフの右下に、H17年度は左上にある。サンプル数は少ないが、H16年度に盛立られた材料のほうが、堅硬であるといえる。

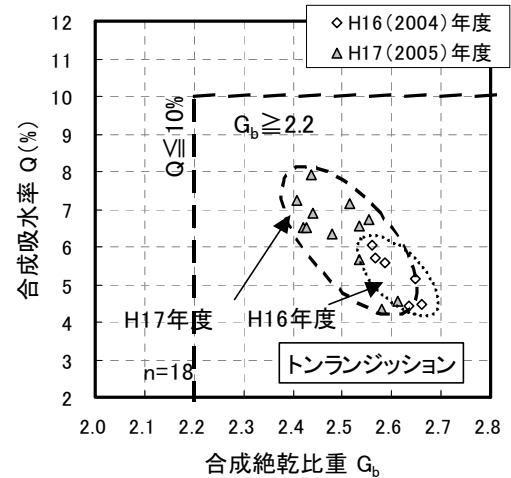


図-13 合成吸水率 Q - 合成絶乾比重 G_b

(2) 合成絶乾比重と乾燥密度の関係

図-14 に合成絶乾比重と乾燥密度の関係を示す。

合成比重と乾燥密度の間には、ロックと同様に合成比重が大きいほど乾燥密度が大きくなる傾向が認められる。一部H16年度のもので乾燥密度が小さなものが認められるが、これは盛立初期のものである。

5.4 圧密排水三軸圧縮試験結果

表-4 に圧密排水条件による大型三軸圧縮試験より得られたせん断抵抗角を示す。せん断抵抗角はいずれも品質管理基準値 $\phi_d \geq 33\text{deg}$ を満足している。

5.5 深度分布

(1) 乾燥密度 ρ_d

図-15 (a) に乾燥密度の深度方向分布を示す。図中には標高ごとの平均値を実線で示した。EL=16m 付近では乾燥密度は小さく、EL=20m 付近で大きくなり、さらに盛立てが上がるにつれて ρ_d は小さくなっている。

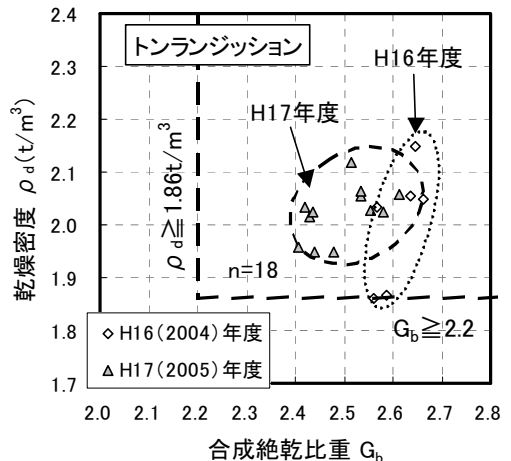


図-14 乾燥密度 ρ_d - 合成絶乾比重 G_b

(2) せん断抵抗角 ϕ_d

図-15 (b) にせん断抵抗角の深度方向分布を示す。

H16年度の結果は、品質管理基準値を大きく上回っているが、H17年度の結果は基準値と同等の値となっている。

表-4 トランジションせん断抵抗角

年度	せん断抵抗角 ϕ_d (deg)	
	品質管理基準値	品質管理試験結果
H16(2004)	33	35.8
H17(2005)		33.0
H18(2006)		-
H19(2007)		-

6. フィルターの品質管理結果

6.1 粒度分布

フィルターはロックと同じ箇所から材料を採取しフィルタープラントで粒度調整を行った。

図-16 に堤体盛立場におけるフィルターの粒度組成を示す。図中には、各年度の粒度組成範囲と平均値を示した。

各年度における通過質量百分率の平均値の差は、差が大ききところで15%程度となっている。各年度の粒度組成範囲の差は大きいところで25%程度となっている。フィルターの品質管理基準値である $D_{max} \leq 150\text{mm}$ 、19mm 通貨質量百分率 $40\% \leq P_{19} \leq 75\%$ 、粒径 0.7mm 通過質量百分率 $P_{0.7} \geq 15\%$ 、細粒分含有率 $F_c \leq 5\%$ はいずれも満足されている。

6.2 ヒストグラム (度数分布)

(1) 乾燥密度 ρ_d

図-17 に堤体盛立場における乾燥密度のヒストグラムを示す。乾燥密度の品質管理基準値 $\rho_d \geq 2.0\text{t/m}^3$ を全て満足する結果が得られた。平均値は 2.20t/m^3 となった。

(2) 合成絶対乾比重 G_b

図-18 に合成絶対乾比重 G_b のヒストグラムを示す。フィルターの合成比重は、全粒径の合成比重であり、ロックと同様、式 (1) より求めた。

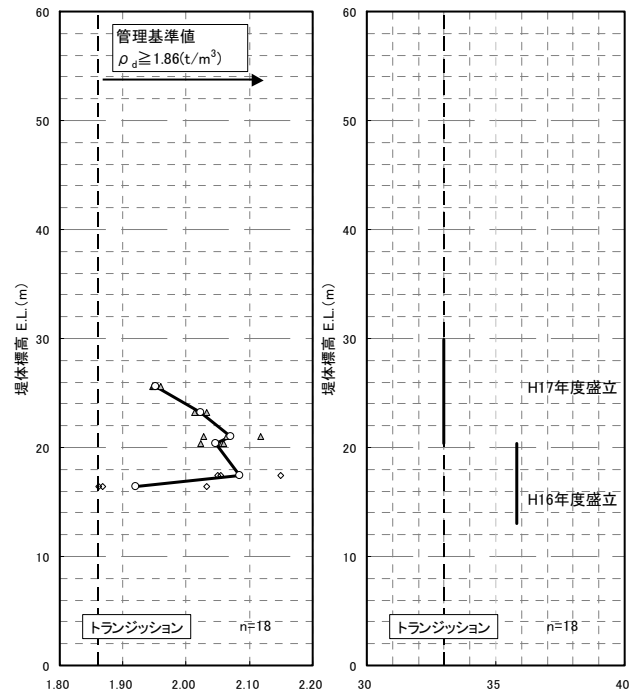
得られた合成絶対乾比重は、品質管理基準値 $G_b \geq 2.5$ を全て満足し、平均値は 2.69 であった。合成絶対乾比重は概ね 2.60~2.75 の範囲に分布し、全般的に大きい値となった。

(3) 合成吸水率 Q

図-19 に合成吸水率のヒストグラムを示す。

合成絶対乾比重と同様に、合成吸水率は全粒径の合成であり、式 (2) より求めた。

得られた吸水率は、品質管理基準値 $Q \leq 5\%$ を満足している。平均値は 2.4% となった。



(a) 乾燥密度 ρ_d (b) せん断抵抗角 ϕ_d
 図-15 トランジション深度方向分布

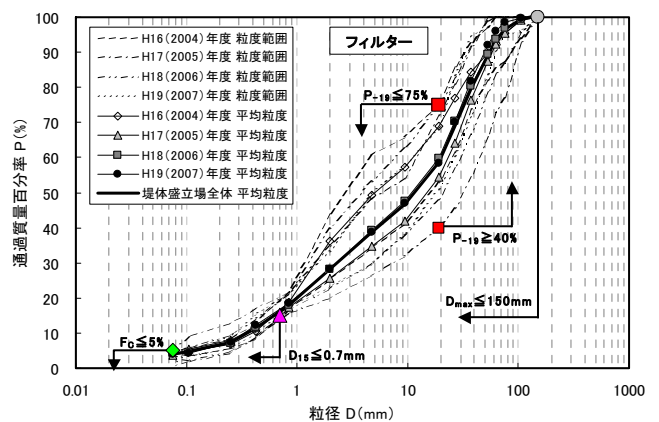


図-16 フィルター粒度組成

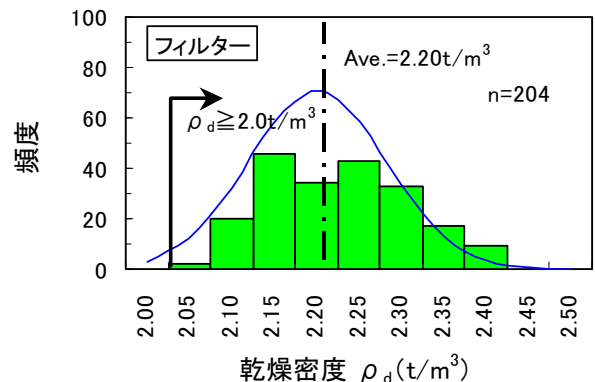


図-17 フィルター乾燥密度 ρ_d ヒストグラム

6.3 合成絶乾比重との相関関係

(1) 合成絶乾比重と合成吸水率の関係

図-20 に合成絶乾比重と吸水率の関係を示す。年度ごとのグループに着目してみると、年度が進むにつれて合成吸水率 Q のプロットはで右下側に推移している傾向がある。これはロックと同様であり、H16 年度の材料に関しては、原石山の材料採取の深度が浅いために風化の影響が大きく、吸水率が大きな傾向を示していると考えられる。

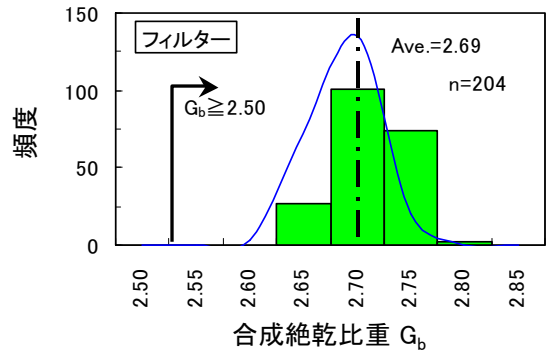


図-18 フィルター合成乾燥比重 G_b ヒストグラム

(2) 合成絶乾比重と乾燥密度の関係

図-21 に合成絶乾比重と乾燥密度の関係を示す。合成吸水率と乾燥密度の間には特徴となる強い相関性は認められず合成絶乾 2.6~2.8 の範囲で乾燥密度がばらついていた。

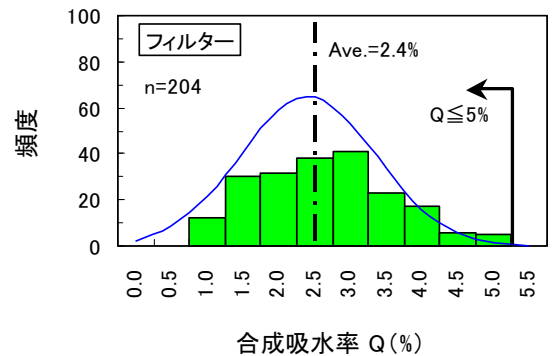


図-19 フィルター合成吸水率 Q ヒストグラム

6.4 圧密非排水三軸圧縮試験結果

表-5 に圧密排水条件による大型三軸圧縮試験より得られたせん断抵抗角を示す。せん断抵抗角はいずれも品質管理基準値 $\phi_d \geq 41 \text{deg}$ を満足している。

6.5 深度分布

(1) 乾燥密度 ρ_d

図-22 (a) に乾燥密度の深度方向分布を示す。

図中には、標高 2.4m ごとの平均値を実線で示した。

平均値に着目すると、標高約 26m 付近と標高約 32~40m 付近の乾燥密度は小さい傾向を示している。

(2) せん断抵抗角 ϕ_d

図-22 (b) にせん断抵抗角の深度方向分布を示す。

せん断抵抗角は H16 年度が一番大きく、H18 年度が一番小さくなっている。図-22 (a) の乾燥密度のグラフと比較すると、分布形状が似た傾向にあることがわかる。したがって、深度分布のグラフからもせん断抵抗角は乾燥密度に強く影響を受けていると考えられる。

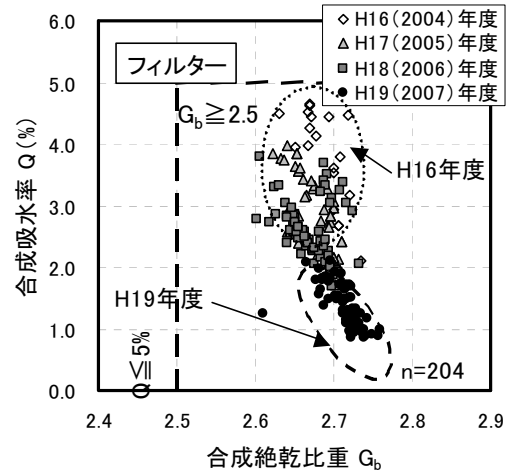


図-20 合成絶乾比重 G_b —合成吸水率 Q

表-5 フィルターせん断抵抗角 ϕ_d

年度	せん断抵抗角 ϕ_d (deg)	
	品質管理基準値	品質管理試験結果
H16(2004)	41	44.7
H17(2005)		43.4
H18(2006)		41.4
H19(2007)		42.8

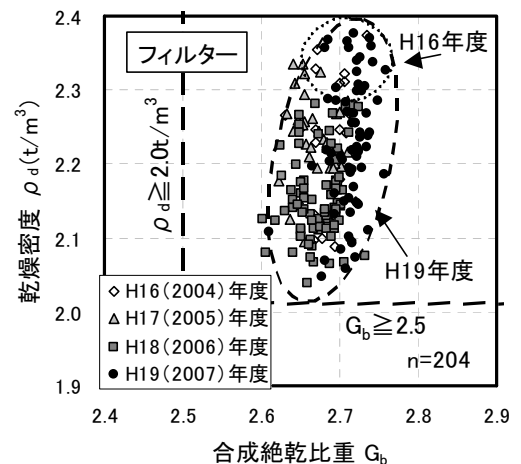
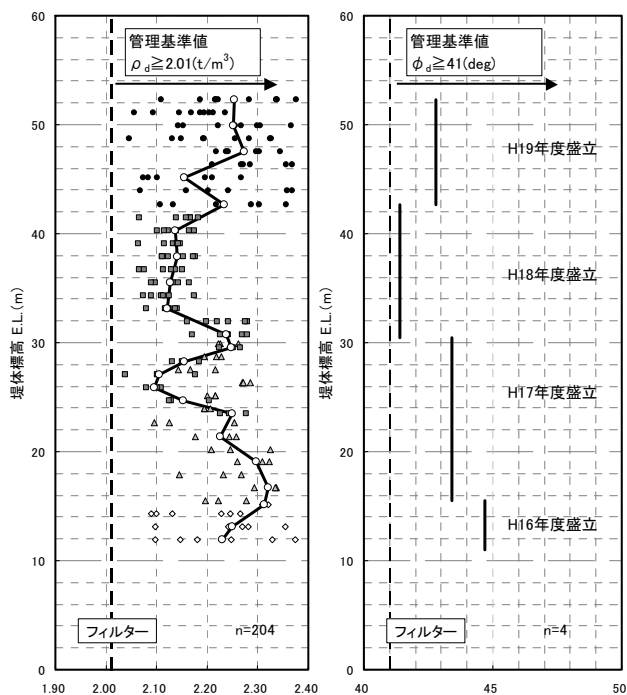


図-21 合成絶乾比重 G_b —合成吸水率 Q



(a) 乾燥密度 ρ_d (b) せん断抵抗角 ϕ_d
 図-22 フィルター深度方向分布

7. まとめ

留萌ダムの堤体盛立完了にともない、ロック・トランジション・フィルターの品質管理試験結果を取りまとめた。

- ① 留萌ダムのロック、トランジション、フィルターは1箇所の原石山より材料が選別採取された。堤体盛立場での各材料の品質管理結果より、各材料は適正に選別され、盛立が実施された。
- ② 合成吸水率と合成絶乾比重の関係より、絶乾比重が大きくなると、吸水率は小さくなる傾向が見られた。
- ③ 乾燥密度と合成絶乾比重の関係より、絶乾比重が大きくなると、乾燥密度も大きくなる傾向が見られた。
- ④ 三軸圧縮試験結果より、せん断抵抗角は比重や吸水率よりも乾燥密度に影響される傾向があることがわかった。

Summary In Rumoi Dam, the fill placement in the impervious zone (core zone) of the dam body was started on May 25, 2004 and the filling of the final stratum was completed on August 31, 2007. The results of quality control were compiled at the completion of fill placement in the dam body. This paper describes the results of quality control of coarse materials in the rock, transition and filter zones at the site of fill placement in the dam body.

Key Words : Rock-fill Dam, quality control, coarse graded materials, sorted materials

8. おわりに

本品質管理試験を進めるにあたり、実験を一緒に進めてくださった技術研究所の知久倫子氏、(有) TNS の染谷昇氏と現地より試料を送付して下さった留萌ダム企業体の鈴木貴之氏に心より感謝の意を表します。

【参考文献】

- 1) 西元守人, 伊藤淳, 嶋本栄治, 沼田淳紀: 大型三軸試験装置を用いた留萌ダム粗粒材の品質管理試験, とびしま技報, No.55, 2006
- 2) 土質工学会: 岩の調査と試験, 岩の調査と試験編集委員会