

足羽川ダムにおける着岩RCDの施工について

渡邊 智大¹・今田 光一²

¹近畿地方整備局 足羽川ダム工事事務所 工事課 (〒910-0005福井県福井市大手3-14-9)

²清水・大林特定建設工事共同企業体 (〒910-2513福井県今立郡池田町寺島21-41-1)

RCD工法によるダムの着岩部は有スランプコンクリートで施工しており、重機の段取りや打設の養生期間が必要で施工の効率性向上を阻害するといった課題があった。

近年では、それらの課題の解消、施工の効率化を目的として着岩RCD工法が開発され、平坦部や緩勾配箇所での施工が進められている。

足羽川ダムでは、更なる施工性の向上を目的に、急勾配箇所における着岩RCD工法の施工仕様を決定し、施工を実施した。施工後に採取したコアの試験結果から、不陸への充填性および密実性が確保されていることを確認した。

キーワード 足羽川ダム, RCD工法, 着岩, 効率化, 充填性

1. はじめに

足羽川ダムは、九頭竜川水系足羽川の支川部子川（福井県今立郡池田町小畑地先）（図-1）に建設する高さ96m、総貯水容量28,700千m³、有効貯水容量（洪水調節容量）28,200千m³の重力式コンクリートダムである。下流域の洪水被害軽減を目的としており、平常時は水を貯留しない洪水調節専用の流水型ダムである。2026年7月末時点における堤体工の進捗は、コンクリートの打設高さ91m、打設量65万m³と全体の約97.5%の進捗となっている。

足羽川ダムは中標高部において高速施工を目的とし、RCD工法を採用したダムである。RCD工法はゼロスランプの内部コンクリートを打設し、端部法面の締固めを実施した後に、有スランプの外部コンクリートを施工することで高い施工性を確保した打設工法である。施工方法を図-2に示す。



図-1 足羽川ダム位置図

RCD工法によるダムの着岩部は、基礎岩盤の不陸凹凸への確実なコンクリート充填と一体化による密実性を確保する必要があることから、有スランプコンクリートで打設されてきた。そのため、着岩部では有スランプコンクリートで使用する施工重機が必要であり、RCD工法で使用する重機と異なることから、重機の錯綜や大幅な段取り替えが生じ、施工の効率性向上を阻害する要因であった。また、内部コンクリートと異なり、有スランプコンクリートでは、打設後に養生期間が必要となるため、次リフトに向けた準備作業（GC・清掃）までの待ち時間が長くなることで打設サイクル向上短縮に影響を与えていた。しかし、近年では段取り替えを不要とし、着岩部のコンクリート打設の施工効率を大幅に改善することを目的に、着岩部の要求性能を満足する着岩RCD工法が開発・採用された。¹⁾福岡県の実ヶ山ダムでは堤体右岸河床部の基礎岩盤の緩勾配箇所が着岩RCD工法で施工されている。また、九州地方整備局の鶴田ダムの再開発では既設洪水吐きの改修工事において河床の平坦箇所が着岩RCD工法で施工されている。

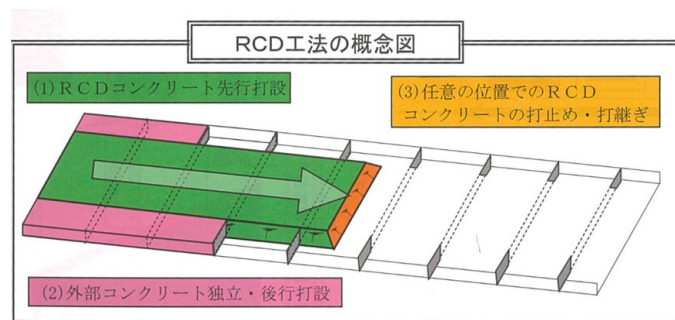


図-2 RCD工法の概念図¹⁾

表-1 着岩RCDコンクリートの配合区分図

配合名	区分	配合条件						単位量 (kg/m ³)									
		骨材の最大寸法	SL, SF 範囲	VC値の範囲	空気量の範囲	W/B	s/a	水	セメント	フライアッシュ	膨張材	細骨材	粗骨材			A E 減水剤 15SR	
		(mm)	(cm)	(秒)	(%)	(%)	(%)	W	B			S 1	80-40	40-20	20-5	(B × %)	(kg/m ³)
									C	FA	EX		G1	G2	G3		
D1	着岩RCD	40	—	20.0 ±10.0	1.5 ±1.0	50.9	45.2	112	154	66	—	954	—	522	638	0.6	1.320

上記のように、着岩RCD工法は既往の施工実績があるが、足羽川ダムでは、RCD工法のさらなる施工性向上を図るため、急勾配箇所では着岩RCD工法に取り組んだ。

本稿では、急勾配箇所における仕様決定の試験施工結果および堤体での実施の結果を報告する。

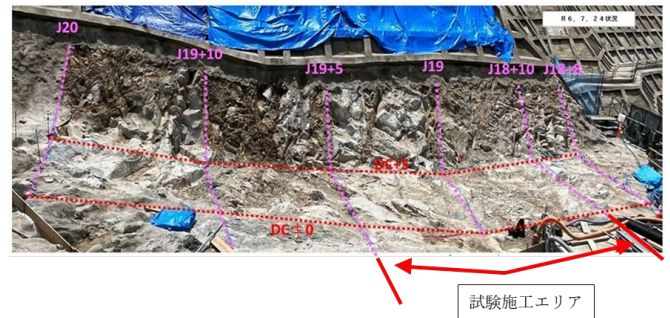


図-3 試験施工した岩盤の状況

2. 急勾配箇所における着岩RCDの試験施工

(1) 試験施工

急勾配箇所での着岩RCD工法では、岩盤に対して垂直方向の締固めのみで、不陸部へのコンクリートの充填と密実性を確保できるかが課題であった。このため着岩RCDコンクリートの配合の選定、敷均し転圧方法の設定、コンクリートの品質管理要領の妥当性を検証することを目的として試験施工を実施した。試験施工は堤体内で実施し、実施と同等の勾配条件下で行った。

試験に使用したコンクリートの配合を表-1に示す。使用した着岩RCDコンクリートは、不陸部への充填性の向上を図るため、堤体内部コンクリートで使用している最大骨材寸法80 mmを40 mmに変更した。また、単位結合材量は足羽川ダムの外部コンクリートと同等の220 kg/m³とし、スランプ0 cmのRCD施工用コンクリートとした。

試験施工は、堤体右岸EL220m盤の岩級CL～CM級および岩級CM～CH級のエリアを対象に実施した。試験施工箇所の岩盤の状況を図-3に示す。また、着岩RCDコンクリートのまき出し厚さは、20cm×5層および25cm×4層と2条件を設定した。試験施工の仕様一覧を表-2に示す。対象箇所を図-4、エリア分けを図-5で示す。

試験施工では、試験前準備として平坦部の岩盤凹凸部に着岩RCDコンクリートを先行打設し、不陸整正を実施した。

平坦部における着岩RCD工法は、試験施工を行うための十分なヤードを確保できる原石山で試験施工を実施し仕様を決定した。

着岩RCD工法の試験施工は、以下の手順で行った。

- ①手塗りによるモルタルの散布。
- ②着岩RCDコンクリートをケーブルクレーンで運搬。
- ③0.4m³級バックホウでまき出し。

表-2 試験施工の仕様

区画	着岩部		転圧仕様	アバットメント部		転圧仕様
	重機	厚さ		重機	厚さ	
CL CM 卓越部	60kg ランマ	25cm	4 往復	端部 締固め機	25cm	30 秒
CM CH 卓越部	60kg ランマ	20cm	4 往復	端部 締固め機	20cm	30 秒

一般RCD施工部

着岩RCD施工部

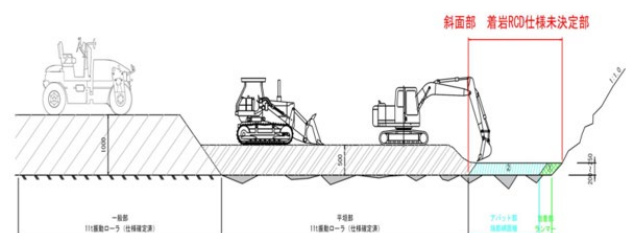


図-4 試験施工の対象箇所

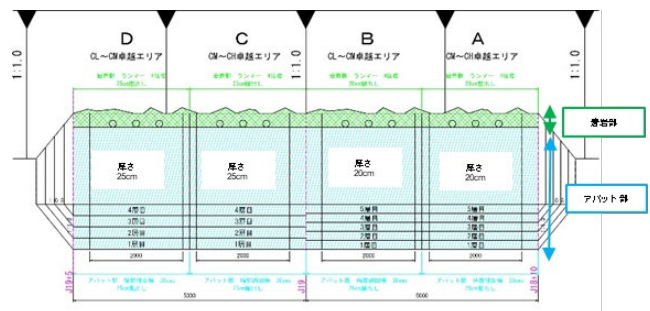


図-5 試験施工のエリア分け



図-6 試験施工の状況

④転圧・締固め.

比較的大型の重機で転圧可能な着岩手前のアバット部については端部締固機を用いて各層30秒の締固めを行った。岩盤際については、大型重機が近寄れないため、60kgランマを使用し4往復の締固めを行った。試験施工の状況を図-6に示す。

(2) 試験施工の結果

試験施工を実施した法面のアバット部および着岩部で、着岩RCDコンクリートと岩盤の密着状況・強度を確認することを目的にコアを採取（図-7）した。採取したコアの観察を行うとともに、材齢91日の圧縮強度試験および単位容積質量試験を実施した。コアの状況を図-8、圧縮強度試験および単位容積質量試験結果を表-3に示す。

コア表面の観察結果から、概ね有害な空隙は認められず、密実な状態であった。また、岩盤と着岩RCDコンクリートの密着状態も良好であった。

圧縮強度試験の結果、1箇所のコアを除き、圧縮強度が設計基準強度である25.2N/mm²を上回った。設計基準強度を下回ったコアは、コンクリートのまき出し厚25cm、岩級CL～CM級のDエリアから採取したD-S-5であった。

D-S-5のコアを断面でカットしたところ、コア表面から内部にかけて空隙が確認された。（図-9）

既往の研究²⁾では、転圧・締固め時に、骨材が微動することで骨材周辺に空隙が生じることが報告されている。本試験施工においても、ランマによる締固め時に同様の現象により空隙が発生し、この空隙を起点に圧壊につながり、強度が低下したものと考えられる。

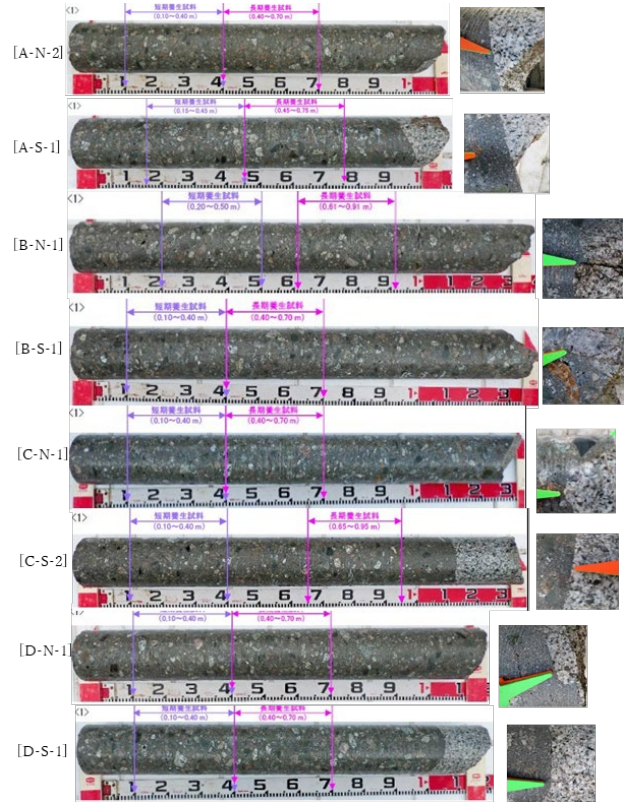


図-8 コアの状況

表-3 試験の結果

エリア	供試体番号	コア評価	単位体積重量 (t/m ³)	エリア別平均 (t/m ³)	圧縮強度σ ₉₁ (N/mm ²)	エリア別平均 (N/mm ²)	標準偏差 (N/mm ²)
A	20cm×5層 端部締固機 アバットCMH	A-N-1	2.489	2.487	36.3	34.7	2.4
		A-N-2	2.480		33.6		
		A-N-3	2.491		38.3		
		A-N-4	2.520		32.6		
		A-N-5	2.475		32.9		
	20cm×5層 ランマ 着岩CMH	A-S-1	2.519	2.502	41.1	34.3	4.3
		A-S-2	2.512		33.4		
		A-S-3	2.503		37.3		
		A-S-4	2.480		29.0		
		A-S-5	2.502		29.3		
B	20cm×5層 端部締固機 アバットCLOM	B-N-1	2.506	2.498	43.9	42.1	4.0
		B-N-2	2.500		46.9		
		B-N-3	2.489		40.5		
		B-N-4	2.475		36.3		
		B-N-5	2.541		43.0		
	20cm×5層 ランマ 着岩CLOM	B-S-1	2.756	2.554	32.9	36.8	5.6
		B-S-2	2.433		35.3		
		B-S-3	2.487		38.4		
		B-S-4	2.595		45.6		
		B-S-5	2.590		31.7		
C	25cm×4層 端部締固機 アバットCMH	C-N-1	2.487	2.503	32.0	37.8	4.6
		C-N-2	2.465		37.3		
		C-N-3	2.461		42.0		
		C-N-4	2.477		35.0		
		C-N-5	2.624		42.8		
	25cm×4層 ランマ 着岩CMH	C-S-1	2.509	2.492	35.1	33.9	1.3
		C-S-2	2.489		34.6		
		C-S-3	2.476		32.1		
		C-S-4	2.518		32.9		
		C-S-5	2.466		34.5		
D	25cm×4層 端部締固機 アバットCLOM	D-N-1	2.481	2.482	39.4	39.6	2.4
		D-N-2	2.457		39.0		
		D-N-3	2.487		43.7		
		D-N-4	2.506		38.7		
		D-N-5	2.480		37.3		
	25cm×4層 ランマ 着岩CLOM	D-S-1	2.477	2.459	34.9	34.9 (32.4)	2.1 (5.9)
		D-S-2	2.485		36.7		
		D-S-3	2.378		32.0		
		D-S-4	2.487		36.1		
		D-S-5	2.469		27.4		

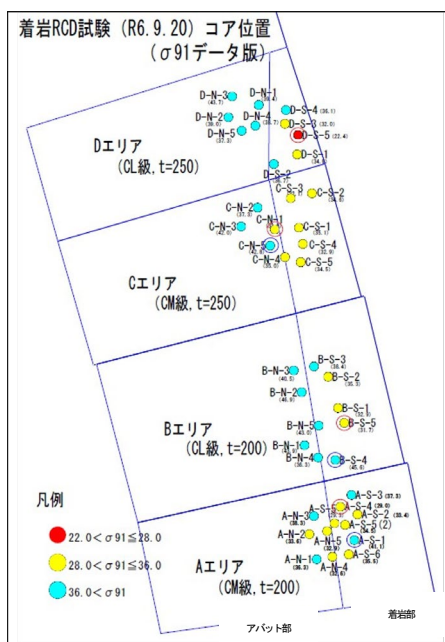


図-7 コアの採取位置

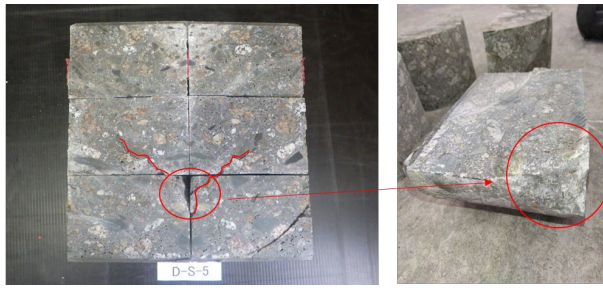


図-9 D-S-5の空隙

単位容積質量試験の結果では、単位容積質量の最小値が2.378t/m³であり、すべてのコアで規格値2.3t/m³を上回る結果となった。

3. 着岩RCDの実施工

(1) 堤体での採用

試験施工により、着岩RCD工法が急勾配箇所においても所要の品質および性能を確保できることを確認した。この結果を踏まえ、足羽川ダム堤体の左右岸急勾配箇所に着岩RCD工法を採用した。堤体で実施した施工仕様を表-4に、施工手順を図-10に示す。採用した範囲はダム堤体(EL175～EL271m)に対し、左岸はEL219～239m、右岸はEL229～255mとした。(図-11)

施工の状況は図-12～15のとおりでRCD工法と同じ重機で施工している。

表-4 実施工での着岩RCD工法の仕様

着岩部		転圧仕様	アパートメント部		転圧仕様	平坦部	
重機	厚さ		重機	厚さ		重機	転圧仕様
60kg ランマ	25cm	4往復	端部締め機	25cm	30秒	11t振動ローラー	6往復

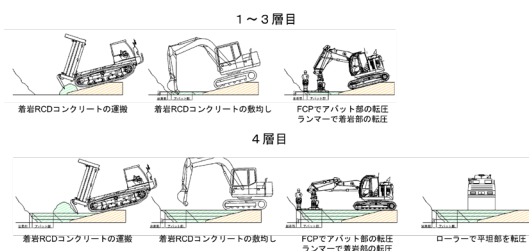


図-10 着岩RCD工法の施工手順

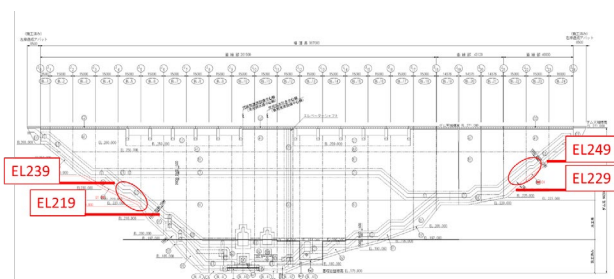


図-11 着岩RCD工法を採用した範囲



図-12 着岩RCDコンクリートのまき出し



図-13 ランマによる転圧

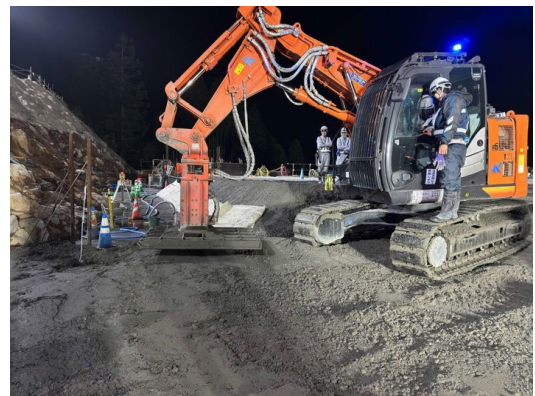


図-14 端部締め機による転圧



図-15 11t振動ローラーによる転圧

表-5 着岩RCDの効果

	採用前	採用後
重機の段取り替えの低減	RCDコンクリートの施工で使用しない、パイバック等の重機を使用する必要が生じた。	内部コンクリートと着岩部の施工で同様の重機を使用することができ、重機の移動や安全通路盛替え等が低減し施工性が向上した。
打継面処理、仕上掘削等次工程への早期着手	着岩コンクリート(有スランプ)施工後、打設箇所に人や重機等が乗り、打継面処理、仕上掘削等の施工を開始するためには、養生期間(24時間程度以上)が必要。	着岩RCD工法を採用することで、打設終了後速やかに人や重機等が打設箇所に乗ることが可能であり、早期に打継面処理や仕上掘削等を開始することができた。
SC プレミアムベルコンの早期使用開始 3)	有スランプコンクリートでは養生期間中(24時間程度以上)、SCプレミアムベルコン使用中、堤体打設に使用するグランドホッパを打設箇所に設置できず、打設開始が遅滞した。	着岩RCD工法を採用することで、打設終了後速やかにグランドホッパを打設箇所に設置でき、SCプレミアムベルコンを使用した早期打設開始を実現した。
打設前検査回数の低減	有スランプコンクリートと内部コンクリートの施工を同時に行えないため、検査前の清掃や検査を別で実施する必要があった。	着岩RCDコンクリートと内部コンクリートを並行して施工できるため、一度に清掃でき検査を同時に実施することができた。

(2) 実施工結果

着岩RCD工法の適用効果を表-5に示す。着岩RCD工法の適用により、コンクリートの運搬、まき出しおよび締固めを内部コンクリートと同一の施工機械で実施することが可能となった。その結果、重機の錯綜や段取り替えが低減され、施工性の向上が図られた。また、従来の有スランプコンクリートでは、施工後24時間の養生期間を確保する必要があり、その間は人力作業や重機の立入ができなかった。一方、着岩RCD工法では有スランプコンクリートに比べて硬化時間が短く施工後早期に人力作業および重機の立入が可能となることから、グリーンカット(GC)や清掃等の準備作業に係る待機時間が短縮され、打設サイクルの向上が図られた。

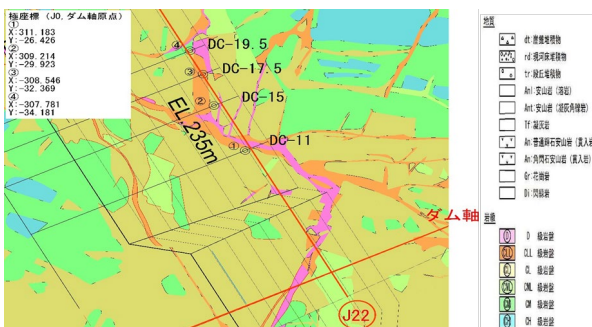


図-16 堤体内コア採取位置(施工前に位置決定)

表-6 測定結果

試験項目	1) 水中置換法による 密度試験 規格値 2.35 g/cm ³ 以上	2) 非破壊試験器による 密度試験 規格値 2.35 g/cm ³ 以上	3) 圧縮強度試験 (σ ₉₁ 相当) 規格値 25.2 N/mm ² 以上
No①孔	2.532 g/cm ³	2.510 g/cm ³	39.2 N/mm ²
No②孔	2.509 g/cm ³	2.524 g/cm ³	33.0 N/mm ²
No③孔	2.481 g/cm ³	2.494 g/cm ³	35.5 N/mm ²
No④孔	2.505 g/cm ³	2.510 g/cm ³	29.8 N/mm ²
平均値	2.507 g/cm ³	2.510 g/cm ³	34.4 N/mm ²

天端からの 深さ	No①孔 g/cm ³	No②孔 g/cm ³	No③孔 g/cm ³	No④孔 g/cm ³
0cm	—	—	2.524	—
5cm	—	2.539	2.465	2.491
10cm	2.464	2.559	2.483	2.499
15cm	2.483	—	2.469	2.473
20cm	2.485	—	2.487	2.518
25cm	2.485	—	2.511	2.525
30cm	2.492	2.526	2.519	2.490
35cm	2.520	2.520	—	2.509
40cm	2.543	2.521	—	2.513
45cm	2.561	2.503	—	2.574
50cm	2.557	2.502	—	—
55cm	2.515	2.526	—	—
60cm	—	2.523	—	—
平均	2.510	2.524	2.494	2.510

(3) 着岩RCDコンクリートの密度・強度の確認

堤体内の着岩RCD工法の施工箇所においてボーリングコアを4箇所採取し、岩盤の密着状況の確認および密度・強度の評価を実施した。採取位置を図-16に示す。

採取したコアについて、円柱供試体となるよう整形し、材齢91日における圧縮強度試験、水中置換法による全体密度の測定および非破壊試験器による深さ方向の密度の測定を実施した。

採取したコアの観察結果から着岩RCDコンクリートと岩盤との密着状態は良好であることを確認した。(図-16) 各試験及び測定の結果を表-6に示す。

圧縮強度試験の結果、4本全てのコアで強度が規格値25.2N/mm²を上回った。

水中置換法による密度試験では、4本全てのコアで密度が規格値2.3g/cm³を上回る結果となった。(図-17)

非破壊試験器による測定には、配管用RI密度計を使用し、深さ方向に5cm間隔で測定を行った。その結果、全ての測定箇所において規格値である2.3g/cm³を上回ることを確認した。(図-18)



図-16 コアの状況

1)水中置換法による全体密度測定

測定方法				
1)容器を重量計に乗せた状態でセッティングし、目盛りで70Lになるように水を入れて重量を測定する(満水状態)				
2)コアを容器に入れた状態でセッティングし、目盛りで70Lになるように水を入れて重量を測定する(コア投入満水重量)				
3)満水状態の容器からコア投入満水重量の数を差し引くことでコアの体積を算出				
4)コア重量とコア体積より比重を算出				
コアNo.	重量(kg)	コア投入後セッティング	コア投入満水重量	比重(g/cm ³)
1号	19.00	24.64	0.30	66.30
2号	19.00	24.64	0.30	66.30
3号	19.00	22.38	0.30	66.30
4号	19.00	22.11	0.30	66.30
平均値				2.507

図-17 水中置換法による密度測定

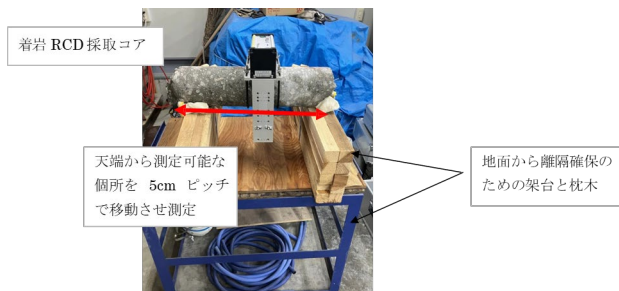


図-18 非破壊試験器による密度の測定

4. 結論

急勾配箇所における着岩RCD工法について試験施工を実施し、施工仕様を決定した。加えて、足羽川ダム堤体で当該施工仕様を適用した結果、岩盤と着岩RCDコンクリートの密着性、強度および密度が所要の品質を満足することを確認した。上記より、急勾配箇所においても着岩RCD工法による不陸部への充填性および密実性を確保できることを示した。今後、同様の条件を有するダムへの適用により、さらなる施工の効率化が期待される。

今回の施工では、着岩部をランマを用いて人力で施工しているが、基礎岩盤のオーバーハング等の要因でランマが入れない場合、施工できないといった課題があった。ランマで施工できない場所を施工する方法を確立することができれば着岩RCD工法の適用範囲を広げることができると考える。

さらに、まき出し厚の増大及びアバット部と着岩部をあわせて端部締め機で施工する等、締め固め時間の短縮に関する検討ができれば更なる施工の効率化を図ることができると考える。

謝辞：本試験にご協力いただいた全ての皆様に感謝いたします。(一財)ダム技術センターには試験施工の計画や施工の評価で技術的助言をいただきました。皆様のご支援に心より感謝いたします。

参考文献

- 1) (一財)ダム技術センター：RCD工法施工技術資料，2019年，3月
- 2) 天明 敏行ら：RCD コアのX線CT法による物性分布の評価，土木学会論文集F，土木学会，Vol.64 No.3，248-260，2008.7
- 3) 糸 純司，長谷川 悦央：ダム建設現場におけるi-Construction 2.0 ～足羽川ダムの挑戦～