
招待論文

Invited Paper

招待論文

コンクリートダムの施工方法の変遷

HISTORICAL REVIEW OF CONSTRUCTION TECHNIQUE FOR CONCRETE DAM

水越達雄*

By Tatsuo MIZUKOSHI

1. はじめに

わが国初のコンクリートダムは、明治33年神戸市が水道用として建設した重力式の布引五本松ダムで、その規模は、高さ33m、堤頂長110m、堤体積2.2万m³である。

その後、現在に至るまで各地でコンクリートダムが築造され、現存する15m以上のコンクリートダムは、1011に達している。その型式別内訳をみると、表-1に示すとおり重力式935、アーチ式57、中空重力式13、バットレス式6となっている。

これらコンクリートダムの建設にあたり、その施工方法は、ダムコンクリートが所要の強度、水密性、耐久性を満足するよう、時代の最新技術を取り込みながら、種々の変遷を繰り返してきているが、その根底に横たわる課題は変わらず、ダム技術者はこの課題の解決に最大の努

力を費やしてきた。すなわち施工方法の変遷の歴史は、時代時代における要求品質を満たしながらいかに単位水量、単位セメント量を減らしかつワーカブルなコンクリートが得られるかという課題への挑戦の歴史といっても過言ではない。

ここでは、このような観点から、コンクリートダムの施工方法の変遷について、時代を追って、材料、施工機械、施工方法およびコンクリートの品質等の技術進歩の足跡をたどるとともに今後の技術課題について言及することとしたい。

2. コンクリートダムの型式と規模の変遷

(1) 大正時代

前述した布引五本松ダム以降明治末期まで、コンクリートダムとしてみるべきものはほとんどなく、大正に入って、第一次世界大戦後の好景気に支えられた電力需要の増加に伴う水力発電の急速な発達により、各地に発電用の本格的ダムが建設されるようになった。コンクリートダムがこの時期に次々と築造されるようになったもう一つの背景として、国産セメントの大量生産化、質の向上ならびに価格の低廉化が挙げられる。

大正時代に造られた高さ15m以上のコンクリートダムは、表-2に示すとおりであり、そのほとんどが重力式ダムで、その他としては、バットレスダム2である。

この時代のダムの規模については、高さ40m程度以下、堤体積8万m³程度以下が大半であるが、木曾川で建設された大井ダムは、高さ53m、堤体積15.3万m³と当時としてはきわめて大規模なダムで、これを契機としてその後続々と大型ダムが建設されていることから、近代コンクリートダムの先駆として位置付けられるダム

表-1 コンクリートダムの総数(堤高15m以上)

(1987年版ダム年鑑より)

型式別	明治以前	明治	大正	昭和		計
	1866	1867 1911	1912 1925	戦前 1926~1945	戦後 1946~1985	
重力式	0	2	19	128	786	935
アーチ	0	0	0	1	56	57
中空重力式	0	0	0	0	13	13
バットレス	0	0	1	5	0	6
合計	0	2	20	134	855	1011

備考：コンクリート重力式ダムとフィルダムの複合ダム(23か所)は除いた。

* 名誉会員 東京電力(株)最高顧問、常磐共同火力(株)社長
 Keywords: construction technique for concrete dam, historical review, materials, construction equipments, quality of concrete

表一 大正年代のコンクリートダム

ダム名	竣工年	堤高 (m)	堤頂長 (m)	堤体積 ($\times 10^3 m^3$)	型式
黒部	大正 1	34	150	81	重力式
飯豊川第一	" 4	38	52	6	"
大又	" 4	21	87	12	"
高沢	" 6	20	70	3	"
千歳第三	" 7	24	120	11	"
草木	" 7	21	86	8	"
野花南	" 7	21	264	41	"
高橋谷	" 8	19	68	12	"
千歳第四	" 9	22	102	7	"
小荒	" 12	27	28	6	"
志津川	" 13	31	91	40	"
中岩	" 13	26	108	12	"
由良川	" 13	21	90	9	"
大吉井	" 13	53	276	153	"
一野谷	" 15	24	60	14	"
白ノ沢	" 15	24	93	9	"
白水滝	" 15	23	99	13	"
細尾谷	" 15	22	59	6	"
落合	" 15	33	215	45	"
頭佐沢	" 15	21	76	5	"
浦山発電所取水ダム	" 9	12	21	不	明
笹流	" 12	24	169	16	アーチ式 バットレス式
高野山調整池ダム	" 13	21	124	6	"

といえる。

また、日本初のアーチダムとして、荒川支流浦山川の浦山発電所の取水ダム（高さ 12 m）が、大正 9 年に完成している。

バットレスダムとしては、笹流ダム（高さ 24 m）、高野山調整池ダム（高さ 21 m）が最初である。高野山調整池ダムは、信濃川支流中津川において、交通の便が悪く、豪雪地帯であることを考慮し、所要資材も少なく、工期も短いということから、この型式を採用して、大正 12 年 4 月に着工し、1 年 3 か月後の大正 13 年 7 月に竣工している。

（2）昭和前期（戦前、戦中）

昭和年代に入ると、第一次世界大戦によって生じた大正末期より昭和初期にかけての好景気の反動として世界的不況を招いた。この不況はわが国にも波及し、特に電力需要の激減に伴い、水力地点の開発も昭和 6 年から低減し昭和 8 年には、大正以来の最低を示した。

その後、満州事変を契機として、軍需産業を中心とした産業界の景気回復により、逆に電力の供給不足が深刻化し、水力開発の要請が高まった。水力地点の開発は、従来民間会社が独立して行っていたが、国家管理の下で強力、効率的に電源開発を推進するために、昭和 14 年に日本発送電株式会社が発足した。日本発送電株式会社は、戦後昭和 26 年に解体するまで、電源開発の主力を成し、ダム技術の進歩に大きく貢献した。

表一 昭和前期のコンクリートダム

ダム名	竣工年	堤高 (m)	堤頂長 (m)	堤体積 ($\times 10^3 m^3$)	型式
小ヶ倉	昭和 1	40	136	60	重力式
河内	" 2	42	189	68	"
鹿瀬	" 4	33	304	136	"
小牧	" 4	79	301	289	"
祖山	" 4	73	132	146	"
豊実	" 4	34	206	111	"
祐延	" 6	45	126	44	"
梵川	" 8	45	59	18	"
千頭	" 10	64	178	127	"
泰阜	" 11	50	143	128	"
小屋平	" 12	52	120	86	"
帝釈川	" 13	62	35	31	"
塚原	" 13	87	215	363	"
大橋	" 14	74	187	172	"
立岩	" 14	67	179	138	"
岩屋戸	" 17	58	171	145	"
小原	" 17	56	158	93	"
三浦	" 18	86	290	507	"
思原	" 3	23	94	26	バットレス式
真立	" 4	22	61	4	"
豊池	" 5	30	145	21	"
真川	" 5	20	104	8	"
丸沼	" 5	32	88	14	"
三滝	" 12	24	83	9	"

同じ時期に、西日本の大干ばつ（昭和 14 年）を契機として、治水、かんがいならびに戦時下の電源確保の観点から県営ならびに国営の河水統制事業による多目的ダムが各地で盛んに計画され建設が開始された。しかしながら戦争の激化のため、ほとんどのダムが工事を中断し、完成したのは戦後においてである。

この時代のダム建設は、大正 8 年 Abrams（米国）が提唱した水セメント比説、大正 14 年物部が発表した耐震設計法や、温度応力等の理論的研究ならびに施工技術の進歩と相まって、コンクリート重力式の高ダムの建設が急速に進み昭和 5 年には庄川筋に高さ 79 m の小牧ダムおよび 73 m の祖山ダムが竣工するに至った。特に小牧ダムにおいては、この当時、温度応力とこれに起因するクラックの発生に注目されだしたこともあり、コンクリートの内部温度の影響について調査・研究がなされ、その後のダム施工方法、特に単位セメント量、単位水量、低水和熱セメントの使用、ブロック割り等の変革に、大きな影響を与えた。

この時期のコンクリート重力式ダムの規模は、表一 3 に示すとおり高さ 50 m 以上、堤体積 10 万 m^3 以上のものがかなり築造されるようになり、後述する塚原ダムのように高さ 87 m、堤体積 36 万 m^3 と大規模なダムも出現するようになった。

またこの時期の特徴として、思原ダム（高さ23m、昭和3年竣工）、丸沼ダム（高さ32m、昭和5年竣工）等のバットレスダムが資材の軽減、工期の短縮等の理由で相次いで建設されたが、主に施工が複雑で難しいことならびに保守の困難性から、昭和12年に竣工した三滝ダム（高さ24m）を最後として建設されなくなった。

(3) 戦後から現在

戦時中はダム建設も中断されていたが、戦後の目覚ましい経済復興とともに相次いで復活した。特に昭和14年以降国庫補助による、治水・発電を主目的にした「河水統制事業」は昭和26年「河川総合開発事業」へと発展継承され、各地に多目的ダムが建設されるようになり、大正から昭和前期までのダムが、電力主体であったものが、治水、かんがい、工業用水、発電とその目的も多様化し現在に至っている。

またコンクリートダムの型式も、重力式に加え、中空重力式、アーチ式の新型式が採用されるようになり、設計・施工面で最も華やかな大ダム建設の時代を迎えた。

コンクリート重力式ダムは、材料、施工方法、施工機械における急速な技術革新により規模も大型化し、高さ100m、堤体積100万m³を超える、佐久間、小河内、田子倉、奥只見などの大規模なダムが昭和30年代頃から次々と完成した。これらのダムは、いずれもブロック工法で施工されているが、最近ではさらに施工の迅速化を目指したRCD工法を採用するダムも増えてきている。

アーチダムは、戦後、耐震性、基礎処理技術、アーチ設計理論等設計・施工に関する研究が進み、昭和30年に竣工した高さ113m、堤体積39万m³の上椎葉ダムを初めとし、各地で高さ100m以上のダムが建設されるようになり、昭和39年竣工した黒部ダムは、高さ186m、堤体積160万m³で、現在も国内最高のダム高を誇っている。

中空重力式ダムは、ダム高がおよそ70m以上で河幅が広い地形では、重力式ダムに比べてコンクリート量を削減できるという理由で、昭和32年に竣工した高さ104m、堤体積44万m³の井川ダムを初めとして畑薙第一ダム（高

さ125m、堤体積60万m³、昭和37年竣工）等が建設された。

わが国のコンクリートダムの高さの変遷は、図-1に示すとおりであり、現在、国内最高のダムは型式別に、奥只見ダム（高さ157m、重力式）、黒部ダム（高さ186m、アーチ式）、畑薙第一ダム（高さ125m、中空重力式）、丸沼ダム（高さ32m、バットレス式）で、バットレス式を除きいずれも昭和30年代に築造されたダムである。

3. 施工方法の変遷

コンクリートダムの施工方法は、コンクリートを構成するセメント、骨材、混和材料、水等の材料と、練り混ぜ、輸送、打設、締固め、養生等にかかわる施工設備とが相互に関連しながら、変遷、発達してきている。その変遷の過程をたどると、温度応力を抑制できかつ経済性に優れている貧配合コンクリートをいかに現場に適用していくかが、ダム技術者の長年の課題であることがわかる。

ダムコンクリートの配合は、表-4に示すとおり初期

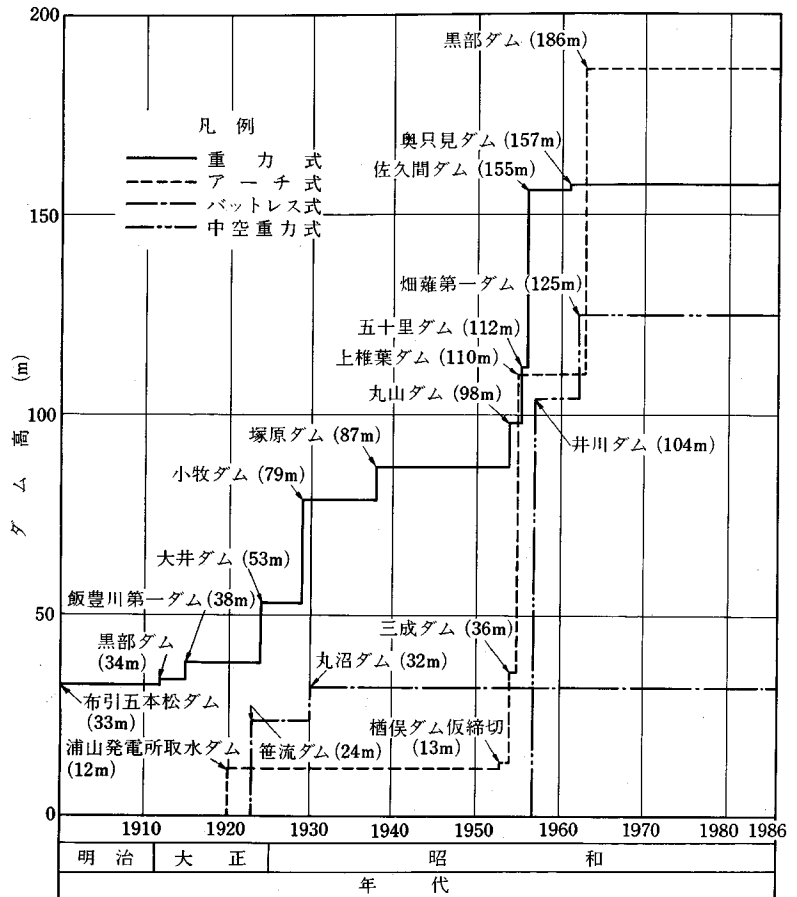


図-1 コンクリートダムの高さの変遷

表-4 代表的ダムのコクリート配合の変遷

型式	ダム名	竣工年	堤高 (m)	堤体積 (m ³) (×10 ³ m ³)	最大粗骨 材寸法 (mm)	スランプ (cm)	単位水量 (kg/m ³)	単位セメント量 (kg/m ³)		水セメ ント比 (%)	細骨 材率 (%)	セメント の種類	混和剤 の種類
								セメント	フライ アッシュ				
重力式	中岩ダム	大正13	26	12	不明	不明	150~180	230	0	66~79	41	普通	なし
"	大井ダム	13	53	153	不明(最大径max 100cm以上)	10cm程度	215	215	0	100	33	普通	なし
"	小牧ダム	昭和4	79	289	不明 (最大径1.7%)	10.0	不明	210~240	0	不明	33	普通	なし
"	塚原ダム	13	87	363	100	3.0	150	220	0	68	36	中庸熱	なし
"	岩屋戸ダム	17	58	145	76	3.0	154	190~220	0	70~80	31	中庸熱	なし
"	三浦ダム	18	86	507	120	3.0	145	200~250	0	58~73	31	中庸熱	なし
"	長沢ダム	24	72	299	120	不明	163	210	0	78	36	中庸熱	なし
"	松尾ダム	26	68	168	100	6.0	147	200	0	74	30	普通・ 中庸熱	AE剤
"	田瀬ダム	28	82	420	150	不明	110	180	0	61	26	普通	AE剤
"	檜俣ダム	29	72	204	150	4.0	120	126	54	67	26	中庸熱	AE剤
"	丸山ダム	29	98	526	150	4.0	103~104	160~180	0	58~64	25~26	中庸熱	AE剤
"	湯原ダム	30	70	282	150	5.0~7.0	137	180	0	76	30	普通	AE剤
"	五十里ダム	31	112	468	150	3.0~5.0	107~112	170~200	0	56~63	26~28	中庸熱	AE剤
"	佐久間ダム	31	155	1094	150	4.0~5.0	105~107	160~200	0	53~67	24	中庸熱	AE剤
"	小河内ダム	32	149	1677	150	4.0	110	135~180	20~50	50~61	27	中庸熱	AE剤
"	小坂部ダム	33	67	116	150	不明	114	190	0	60	29	中庸熱	なし
"	田子倉ダム	35	145	1950	150	2.0~4.0	83~88	105~152	35~48	43~59	20~23	中庸熱	AE剤
"	風屋ダム	35	101	588	150	3.0~4.0	85	105~126	45~54	47~57	21	中庸熱	AE剤
"	奥只見ダム	36	157	1636	150	1.5~3.5	96	98	42	69	23~24	中庸熱	AE剤
"	有峰ダム	36	140	1568	150	3.0~5.0	100	155	0	65	25	中庸熱	減水剤
"	下久保ダム	43	129	1190	150	2.0~4.0	109	150	0	73	27	高炉	AE剤
"	鷲ダム	43	44	113	150	3.0~4.0	93	120	40	58	23	普通	AE剤
"	石手川ダム	48	87	423	150	1.5~2.5	105	160	0	66	25	高炉	AE剤
"	早明浦ダム	昭和49	106	1220	150	0~4.0	105	105	45	70	24~27	中庸熱	AE剤
"	室生ダム	49	63	150	150	2.0~4.0	113	160	0	71	24	高炉	AE剤
"	島地川ダム	55	90	300	80	0	105	84	36	79	34	普通	減水剤
"	大川ダム	58	78	1000	80	0	70~108	128	32	75~90	29~34	中庸熱	AE剤
"	大町ダム	59	107	775	150	3.0~5.0	104	160	0	65	23	中庸熱	AE剤
"	今市ダム	61	76	192	150	0	100	98	42	71	27	中庸熱	AE剤
"	玉川ダム (予定) ⁶²	100	1140	150	2.0~4.0	95	91	39	73	30	中庸熱	減水剤	
アーチ式	上稚葉ダム	昭和30	113	390	150	4.0~6.0	120~125	190~235	0	52~66	25~28	中庸熱	AE剤
"	鳴子ダム	32	95	180	150	3.0~5.0	105	190~230	0	46~55	25~26	中庸熱	AE剤
"	坂本ダム	37	103	174	180	2.0~3.0	83	161~175	69~75	33~36	18~19	中庸熱	減水剤
"	黒部ダム	39	186	1598	180	2.0~4.0	85~87	160~180	0	48~56	20	中庸熱	減水剤
"	池原ダム	39	111	647	150	2.0~4.0	93	161	69	41	23	中庸熱	減水剤
"	川俣ダム	41	117	147	150	3.0~5.0	104	230	0	45	23	中庸熱	減水剤
"	刀利ダム	41	101	148	150	2.0~4.0	104	260	0	40	23	中庸熱	減水剤
"	矢木沢ダム	42	131	707	150	6.0~8.0	106	230	0	46	25	中庸熱	減水剤
"	高根第一ダム	44	133	330	150	3.0~5.0	100	147	63	48	24	中庸熱	AE剤
"	奈川渡ダム	44	155	660	150	2.0~4.0	99	135	45	55	21	中庸熱	AE剤
中空 重力式 (バットレ スを含む)	井川ダム	昭和32	104	437	150	2.5~3.5	98~101	174~196	49~36	41~52	23	中庸熱	AE剤
"	畑薙第一ダム	37	125	598	150	5.0	91~93	127~172	58~43	40~55	23~25	中庸熱	AE剤
"	金山ダム	42	57	230	150	3.0~5.0	106	220	不明	48	22	不明	不明

の富配合の軟練りコンクリートから貧配合の硬練りコンクリートへ徐々に移行してきたが、ここでは、そのための設計・施工方法等の諸技術の進歩について大正時代から現在に至るまでの歴史をひもといてみることにする。

(1) 大正時代

a) 軟練りコンクリートによるダム施工

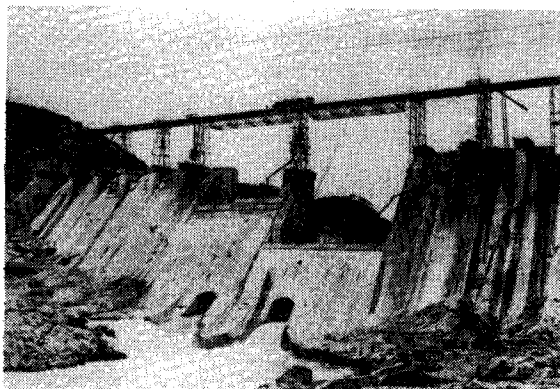
大正時代におけるダムコンクリートは、その大半が富配合の軟練りコンクリートである。この理由としては、①ミキサーがドラム型であり、硬練りに適さないこと、②打設方法は、シュート方式で、硬練りだと打設できないこと、③締固めは、現在のような内部振動器がなく搗固め蝸（つきかためだこ）を用いており、十分締固めることができないこと等施工上の問題点から、単位水量、単位セメント量がともに 220 kg/m^3 程度、スランプ 10 cm 前後の軟練りコンクリートが採用されていた。

またこの時代の配合は、現在のような重量比配合ではなく、容積配合であり、このため骨材、特に砂の水分の変動により、コンクリートのコンシステンシーが大きく変わり、練りまぜは熟練した職工の経験と技術に大きく依存していた。大正末期に着工し昭和4年に竣工した小牧ダム（高さ 79 m ）の記録によると、均質なコンクリートを混練した職工には、報奨を与えたとの記述があり、当時のダムコンクリートの品質管理状況の一端を知ることができる興味深い話である。

大正時代のダムの施工上の特徴として、重量の増加とセメントの節約による工事費の節減を目的としてコンクリート中に重量で 10% 程度の玉石あるいは割栗を混入したことが挙げられる。しかしながら、これは昭和に入ってから、コンクリートの品質の均質性に対する不安ならびに経済的にも余り有利にならないという理由で、塚原ダム（昭和13年竣工）以降は採用されなくなった。

b) 近代ダムの先駆となった大井ダム

大正13年に竣工した木曾川中流の大井ダムは、ダム高、堤体積とも大正時代最大のコンクリートダムであり、



写真一 大井ダム

これはその後、次々と登場した高ダムの先駆となったダムである。大井ダムは、高さ 53 m 、堤頂長 276 m 、堤体積 15.3 万 m^3 であり、工期は大正10年末より大正13年の中頃までの2年半余りで、当時としては異例のスピードで完成したダムである。使用したコンクリートは、容積配合で、セメント：砂：砂利：水を $1 : 3 : 6 : 1$ とした軟練りコンクリートで、記録にはないがスランプは 10 cm 程度であったものと思われる。使用セメントは、当時まだ中庸熱セメントが製造されておらず、普通ポルトランドセメントであった。施工方法は、スミス式ミキサ (0.8 m^3) 4台で練り上げたコンクリートを、ガンリン機関車のけん引するトロックで運搬し、堤体上部に設けた鋼製トレススル上より、斜めシュートで日平均 240 m^3 、日最大 660 m^3 を打設した。また 6 t の固定ケーブルクレーンを2条設け、これによって最大粒径 100 cm の石塊をコンクリート中に投入し、玉石コンクリートとした。ダム工事にケーブルクレーンが使用された例としては最も古く、その後のケーブルクレーンによるコンクリートのバケット打設に大きな影響を与えた。

(2) 昭和前期（戦前、戦中）

a) 軟練りコンクリートから硬練りコンクリートへ

軟練りコンクリートの品質について、当時重点的に検討されていたのは、単位水量が多いため厳寒時施工におけるコンクリートの凍害に関する問題であり、温度応力とこれに起因するクラックの発生には注目されておらず、経験的に横継目を設けた例が多かった。温度応力に伴うクラックが議論されるようになったのは、昭和4年に竣工した小牧ダムの建設にあたっての諸検討が初めての例である。小牧ダムでは、単位セメント量 $210 \sim 240 \text{ kg/m}^3$ 、水セメント比 $70 \sim 85\%$ 、スランプ $10 \sim 15 \text{ cm}$ の配合の軟練りコンクリートを使用しておりコンクリート打設による堤体内の温度上昇の時間的変化を28か所に設置した白金温度計により計測して、コンクリート温度と打設継目の目開きや、局所的なヘアクラックとの関係を解明し、それ以降のダムの温度温力にかかわる設計・施工に多くの情報をもたらした。小牧ダムでの計測結果は、昭和8年にストックホルムで開催された第1回国際ダム会議にも報告された。この問題は、当時国際的にも脚光をあびつつあり、コンクリートダムの技術上、大きな検討課題であった。同じ時期に欧米では、軟練りコンクリートから硬練りコンクリートへ移行しつつあり、Calderwood（アーチ式、高さ 70 m 、昭和5年竣工）、Owyhee（アーチ重力式、高さ 162 m 、昭和7年竣工）、Boulder（アーチ重力式、高さ 222 m 、昭和10年竣工）等のダムで硬練りコンクリートを使用した。特にBoulder（別名 Hoover）ダムでは温度応力を低減するため、低熱セメントならびに、横継目と併せて縦継目を設ける

ブロック工法を初めて採用した。

これら外国での使用実績ならびに小牧ダムでの温度応力の検討が契機となり、コンクリートの品質と施工技术の改善のため、硬練りコンクリートに対する研究気運が飛躍的に高まった。

まず品質に関しては、昭和5年に、所定の水セメント比に応じて、セメントペーストを別途に計量、混練りするウオセクリータが日本で発明され、従来の容積配合から重量比配合に切り変えることにより、品質の均一化に大きな技術革新をもたらした。ウオセクリータはAbramsが提唱した水セメント比説を忠実に施工へ反映したものと見える。しかしウオセクリータは含水量の大きい砂を使用する場合、その分水を減ずる必要があり、回転がスムーズにいかなくなることがあった。

水セメント比説は、今でこそコンクリートの配合設計上当然のこととして受けとめられているが、この法則が一般に普及するには、相当の年月を必要とし、大正12年の関東大震災の復興に、コンクリートが広範囲に使用されたことが、一般の注意を喚起する1つの契機となった。

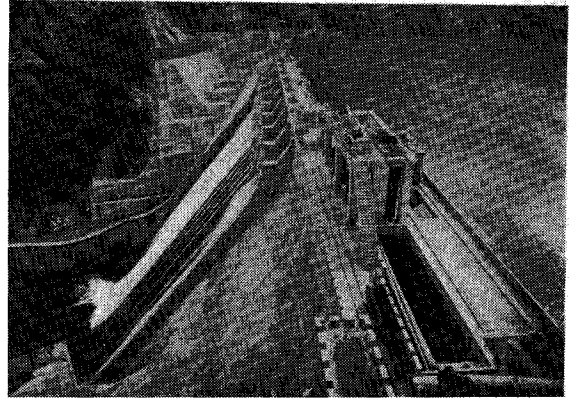
ダムコンクリートにおいても所要の強度を得るため、水セメント比を定め、施工可能な範囲まで単位水量、単位セメント量を減少させることは、温度応力によるクラック発生防止という観点からも重要な課題であり、硬練りコンクリートへの移行は、従来のコンクリート施工法に大幅な改革をもたらした。

またセメントに対しても水和熱の低下への要望が高まった。国際的にも低水和熱セメントの研究が目ざされ、大ダム会議でも盛んに論議されつつあった背景の中で、わが国でも昭和9年に初めて中庸熱セメントが製品化されるようになった。

施工面に着目すると傾斜シュート式施工では、コンクリートがすべりやすいようスランプ10 cm以上の軟練りコンクリートが使用されていたが、立岩ダム（高さ67 m、堤体積13.8万 m^3 、昭和14年竣工）で初めて採用された立シュート式施工では、スランプ5~6 cm程度の中練りコンクリートが可能となり、さらには、塚原ダムで使用されたケーブルクレーンによるバケット式施工では、内部振動機の併用により、スランプ3 cm程度の硬練りコンクリートが実現した。硬練りコンクリートの使用により、軟練りコンクリートで問題があった材料分離も著しく減少し、均質なコンクリートが得られるようになった。

b) 硬練りコンクリートを最初に使用した塚原ダム

塚原ダムは、昭和13年宮崎県の耳川に完成した高さ87 m、堤頂長215 m、堤体積36.3万 m^3 の重力式ダムである。このダムは、コンクリートの品質、施工面でそれ



写真—2 塚原ダム

以前のダムと一線を画すものであり以下に示すような多くの新工法・新技术を採用している。

- ① 布引五本松ダム以来行われてきた玉石混入をとりやめスランプ3 cmの硬練りコンクリートの採用
- ② セメントとして水和熱の少ない中庸熱セメントの使用
- ③ 温度応力を考慮してブロック工法の採用
- ④ ウオセクリータを用いた重量比配合の採用
- ⑤ 粗骨材として碎石骨材を粒度調整して使用
- ⑥ 可動ケーブルクレーン（9 t）によるバケット設置の採用
- ⑦ 内部振動器の使用

塚原ダムのコンクリートの配合は、単位水量150 kg/m^3 、単位セメント量220 kg/m^3 、水セメント比68%、スランプ3 cmであり、2台のウオセクリータにより、セメントペーストの計量、混練りを行い、これに骨材を加えてスミス式ミキサー4台（0.8 m^3 /台）で日最大1200 m^3 を混練りした。

セメントは、小牧ダム以降のコンクリートの温度応力の研究や昭和10年竣工したBoulderダムでの低熱セメントの採用等を背景に、水和熱の少ないセメントの開発をメーカーに依頼し、製造方法の研究を重ねた結果、日本で初めて中庸熱セメントを採用することになった。その成分は普通ポルトランドセメントに比べて、比較的シリカが多く酸化カルシウムおよびアルミナが少ない組成となっている。

水和熱は、7日で53 cal/g、28日で72 cal/gの実績を示しており、現在の規格（7日で70 cal/g以下、28日で83 cal/g以下）にも十分合格する水準であった。

また塚原ダムでは、それ以前のダムで経験的に設けていた横継目に加えて、縦継目を有するブロック工法を初めて採用した。ブロック割りは左右岸方向に12ブロック（ブロック幅17~21 m）、上下流方向に4ブロック（ブロック幅約17 m）とし、キーは設けずパイプクーリン

グは行っていない。

塚原ダムの縦継目は、変形に対し一体化をはかるため、先行ブロック側面をチップングしてから隣接ブロックを打設しているのが特徴である。このことは継目の機能を考えると矛盾した設計思想とも考えられ、当時から議論のあったところであり、初めてブロック工法に踏みきった設計者の苦勞の跡がうかがえる。

粗骨材は現場上流 400 m の原石山より採取した岩石を 50 t/h のジャイレトリークラッシャ 2 台で破碎し、運搬能力 70 t/h の索道およびインクラインでコンクリートプラントに運搬した。また砂の一部に砕砂を使用したため、さらにブレイクラッシャで 20~30 mm くらいまで 2 次破碎し、これをクラッシングロールにかけて砂を製造した。

コンクリートの運搬には、初めて片側走行型の可動ケーブルクレーン (9t) を採用し、これにより 3 m³ のバケットでコンクリートを打ち込み、内部振動器を使用して締固めた。内部振動器は、輸入、国産の種々のものを試験的に使用したが、最終的には圧縮空気使用による回転数が 6 500~7 000 rpm の国産型を採用した。

以上のように塚原ダムでは、従来になかった材料、工法を採用し、当時としては画期的な機械化施工により、36 万 m³ のコンクリートを 20 か月で打設した。

塚原ダムでの成果は引き続き建設された岩屋戸ダム (高さ 58 m, 昭和 17 年竣工)、三浦ダム (高さ 86 m, 昭和 18 年竣工) 等にも反映され、今日のダム技術の基礎をつくった。

(3) 戦後から現在

a) 硬練りコンクリートの品質改善

戦後、大型機械を用いた施工技術の進歩と相まってダムの大型化が進み、高さ 100 m 以上、堤体積 100 万 m³ 以上のダムが出現するようになり、特にダムコンクリートのセメント使用量の軽減のための研究開発が、水和熱軽減の要求と相まって、強力に進められた。このセメント使用量軽減に一番影響を与えたのは、AE 剤、減水剤、フライアッシュ等の混和材料の使用と骨材特に細骨材の粒度調整である。

AE 剤、減水剤等の混和剤は、アメリカ北部におけるコンクリート道路の凍結融解対策として、昭和 13 年に相次いで開発された。わが国には AE 剤は昭和 23 年に、減水剤は昭和 25 年に導入されており、ダムコンクリートには AE コンクリートが昭和 25 年に天竜川水系の平岡ダム (高さ 63 m, 堤体積 25 万 m³) で初めて本格的に使用され、減水剤は、只見川水系の本名ダム (高さ 52 m, 堤体積 12 万 m³, 昭和 29 年竣工) 等で始めて使用された。

AE 剤を使用することにより、同一スランプを示す普

通コンクリートに対し 6 % 以上の単位水量、ひいては単位セメント量の減少が可能であり、コンクリートの凍結融解などに対する耐久性の向上にも役立った。

減水剤と AE 剤を混合した混和剤は、AE 剤のみの場合よりさらに 4 % 以上単位水量を減ずることが可能で、かつワーカブルなコンクリートが得られるようになった。

上記混和剤と、ほぼ時を同じくしてフライアッシュが使用されはじめた。火山灰、けい酸白土、けい藻土などの天然のポゾランが古代ローマの構造物に使用されたことはよく知られている。人工ポゾランとしてフライアッシュが使用されたのは、折からのセメントの供給不足が深刻化したことが契機となって、米国開拓局の Hungry Horse ダム (アーチ式、高さ 172 m, 昭和 28 年竣工) が最初である。

フライアッシュの効果として、①ワーカビリチーの改善、②長期材令強度の増加、③コンクリートの水和熱の低下、④経済性、などが挙げられ、わが国で初めて使用されたのは昭和 29 年竣工した利根川の楢俣ダム (高さ 72 m, 堤体積 20.4 万 m³) である。楢俣ダムではセメント 126 kg/m³, フライアッシュ 54 kg/m³, フライアッシュ混入率 30 %, 単位水量 120 kg/m³ の配合を用い、材令 91 日でコンクリートの圧縮強度 240 kg/cm², 変動係数 12 % の結果を得ている。それ以前のダムでは、セメント使用量が 200 kg/m³ 前後であったものが、C+F で 180 kg/m³, セメント使用量では 126 kg/m³ と約 70 kg/m³ のセメントの削減を図った。さらに昭和 31 年に竣工した奥只見ダム (高さ 157 m, 堤体積 163.6 万 m³) では、フライアッシュと水を事前に混合し、ペースト状で使用することにより、変動係数の向上を図り、品質の安定したワーカブルなコンクリートが得られるようになり、それ以降のダムにも同様の方法がとられるようになった。

現在では、フライアッシュ混入率は 20~30 % のダムが多く、その場合、単位水量は 85~95 kg/m³ 程度で、普通コンクリートの 100~110 kg/m³ に比較して 10 % 強低減する効果をあげている。

また骨材の品質、粒度も単位水量の減少に影響を与えるということから戦前から粗骨材については、粒度調整を行っていたが、細骨材の粒度調整を初めて実施したのは、丸山ダム (高さ 98 m, 昭和 29 年竣工) で、後続のダムもこれにならうようになった。

以上のように戦後におけるダムコンクリートは、混和剤 (AE 剤、減水剤)、フライアッシュ、骨材の粒度調整等により、所要のワーカビリチーを保持しながら、単位水量、単位セメント量の減少をもたらす、温度応力、経済性の観点から大きな変化を遂げた。またバッチャー

プラント、骨材設備の進歩などによりコンクリートの品質のばらつきも著しく減少し、現在では変動係数10%以下のものも出現しており品質の安定したコンクリートが得られるようになった。

b) 新技術・新工法を取り入れた大ダムの施工

戦後、特に昭和30年代は、わが国の経済、技術が急速に発展した時代で、ダム建設においても技術革新の所産である電子工学、機械工学などの近代科学を積極的に利用して格段の飛躍を遂げた。

戦後のダムは高さ、堤体積とも戦前を大幅に上回り、日打設量の増加に伴う温度応力の規制の観点からブロック工法を採用するダムが増加してきた。このためブロック間の継目グラウトを行う必要性から継目を完全に開口しなければならず、人工冷却の問題が生じこの方面の研究が急速に進んだ。昭和29年に竣工した丸山ダム（高さ98m、堤体積53万 m^3 ）は、1ブロック14mとし、さらに上下流方向に3分割してリフト高1.5mで打設し、プレクーリングおよびパイプクーリングで温度応力を規制した。

その後、上椎葉ダム（高さ113m、堤体積39万 m^3 、昭和30年竣工）、五十里ダム（高さ112m、堤体積47万 m^3 、昭和31年竣工）、佐久間ダム（高さ155m、堤体積109万 m^3 、昭和31年竣工）等、後続の大ダムでは、同様の方式がとられるようになった。

ダム施工の機械化は急速に進み、特に佐久間ダムでは、輸入した20tセメントトレーラー、3 m^3 ミキサ4台を有するワンマンコントロールのミキシングプラント、25tケーブルクレーン等の大型機械により、日最大打設量5200 m^3 と従来にない速度で打設し、着工からわずか3年で完成した。佐久間ダムでの実績は、わが国のダム施工の機械化に大きな自信を与え国産大型機械の製造や性能の向上に大きな刺激となった。

戦後のコンクリートダム技術の進歩の変遷について設備別に記述すると以下のとおりである。

(i) 骨材プラント

ダムコンクリートの骨材は、戦前は天然骨材利用が多く、骨材プラントとしてはふるい分けが主体であったが、戦後、①ダム地点の奥地化により天然骨材事情が悪化したこと、②建設機械の発達により、低廉で良質の碎石骨材が得られるようになったこと、③AE剤の使用により、碎石骨材でもワーカブルなコンクリートが得られるようになったこと、などの理由により、各所で碎石骨材が用いられるようになった。

昭和30年に竣工した上椎葉ダムは、細骨材から粗骨材まですべての碎石骨材を使用した初めてのダムであった。

上椎葉ダムでは、大型ロッドミル（70t/h）により粒

度に注意を払って製砂に成功し、これを契機にロッドミルの性能も改善され、製砂設備も含めた大容量プラントが設備されるようになった。

また天然骨材の粒度調整を行った本邦第1号は丸山ダム（昭和29年竣工）で、原砂を3種類に分級し、それらを再び一定の割合で混合する方式を採用した。

砂の分級にハイドロリックサイザを初めて実用化し、成功したのは佐久間ダムである。

(ii) コンクリートプラント

わが国のコンクリートプラントは、戦後アメリカより輸入したジョンソン社の製品に刺激されて発達した。

プラントの容量は初期には、1.5 m^3 ミキサ4台のものが最大であったが奥只見、佐久間、田子倉等の大規模ダムでは3 m^3 ×4台のものまで使用されるようになった。

操作方式も半自動、自動、全自動と進み計量装置の制御方式もワイヤ、ロッドによる直接式から電子制御方式に移行し、計量精度も向上して、コンクリートの品質の均一化が図られるようになった。

(iii) コンクリート打設用機械

コンクリート打設に使用されるケーブルクレーンは、運搬制御方式の進歩に伴い、その横移動、巻上げ速度を向上させるなどの改良が加えられ、当初4.5t程度だったものが黒4ダムの28t吊り、スパン598mの実績を有するまでに至った。走行方式は、固定、両端走行、弧動型等個別地点の特性に応じて採用されている。

ジブクレーンは、9t×37mのものが小河内ダム（昭和32年竣工）において、25tケーブルクレーンでカバーできないダム下流端部の打設用に使用されたのが初めてである。昭和43年に竣工した下久保ダムにおいては、120万 m^3 に及ぶコンクリートを13.5t吊り門形走行ジブクレーン3台で打設しており、大ダムでジブクレーンにより全コンクリートを打設した最初の例である。

軌条によらず、トラックに生コンホッパーを装備した型式のトランスファーカーは、昭和35年中空重力式の畑薙第一ダム（高さ125m）、昭和36年重力式の藪原ダム（高さ86m）で採用されている。特に藪原ダムでは、ダムサイト下流1.2kmにあるバッチャープラントから生コンをタイヤ方式で輸送し、地形的にダムサイトにコンクリートプラントを設置できない場合の解決の一方法を示した。

昭和30年代に型枠が木製から鋼製に切り替わったことも、ダムの施工性に大きな影響を与えた。鋼製型枠は、木製に比べて転用回数が多く結果的には経済的であること、組立、撤去が容易で施工の迅速化がはかれること、仕上面が美しいことに加えて、型枠面からのコンクリート水和熱の発散が大きいこと等の理由により、昭和36

年に竣工した奥只見ダムをはじめとして、畑薙第一ダム、坂本ダム等において本格的に採用されるようになった。

戦後におけるダム技術の著しい進歩の1つに締固め技術の進歩が挙げられる。振動数8000 rpm以上の高性能棒形振動器が使用されるようになり、棒形振動器数本をセットして用いるいわゆるパイプローダーが有峰ダムで採用され、黒部ダムで大いに活用された。これにより締固め不足箇所が残ることなく、かなり硬練りのコンクリートを施工できるようになり、AE剤やフライアッシュの活用も相まって黒部ダムや坂本ダムに用いたコンクリートの単位水量は、わずかに85 kg/m³程度（単位セメント量160 kg/m³程度）と昭和20年代以前ではとうてい考えられなかった量まで減ずることができるようになった。

4. 最近の新技术——RCD工法——

(1) RCD工法開発の背景

戦後の復興期、高度成長期とその後しばらくは、コンクリートダム全盛で経過したが、コンクリートダムに適した基礎岩盤を有する地点が少なくなってきたことなどから、しだいにフィルダムが増えその規模も大きくなってきている。特に近年の大型機械の性能向上、労働力の不足などから機械化施工による合理化が著しい進歩をみせている。

一方、コンクリート重力式ダムの施工については、Boulderダム以来踏襲されてきた従来の手法、つまりスランプ3 cmのコンクリートをブロック別に打設し、それを内部振動機で締固める方法では、機械化などによる大幅な合理化が難しいことから、新しい施工技術の開発をめざしてフィルダムの施工技術を導入しようとする動きが出てきた。この動きの中でRCD (Roller Compacted-Dam Concrete) 工法が開発された。これは文字通りコンクリートをコア材のように敷きならし、振動ローラーで締固める工法であり、これまでのダム用硬練りコンクリートをさらに超硬練りにしたスランプ0 cm、単位水量90~100 kg/m³、単位セメント量120~130 kg/m³のコンクリートが出現することとなった。

(2) RCD工法の特徴

RCD工法は昭和49年建設省を中心に設けられた「コンクリートダムの合理化施工に関する研究委員会」を中心に本格的な検討に着手し、ダム本体としては昭和53年島地川ダムに初めて適用され、以来玉川ダムまで逐次改良が加えられてきている。

具体的には、ダンプトラックによる運搬、ブルドーザーによる薄層巻出し、振動ローラーによる締固め、振動目地切機による継目処理、モータースーパーによる打設面処理、強制練りミキサーによる練りませ等の細部技術に

大きな改善がなされた。その結果としてコンクリートの性質についても、振動ローラーにより締固めるため、載せても沈まないスランプ0 cmの超硬練りとしたこと、発熱を抑えるため単位セメント量（フライアッシュ混入）を120~130 kg/m³と少なくしたこと、材料分離を減らすため細骨材率を30%以上と大きくしたこと、コンシステンシーの品質管理のため大型VC試験機 (Vibrating Consistency Test Machine) を考案・採用したこと等の工夫を行い、貧配合設計ながら所要の強度を得ている。

このようにRCD工法は基本的にはコンクリート重力式ダムとしての設計思想を変えるわけではなく、機械導入による人力作業の軽減化と建設費の節減、広い打設面での作業による安全性の向上等をめざしたものと見える。

(3) RCD工法の発展経緯

RCD工法について初めて大がかりな野外実験が行われたのは昭和51年大川ダムの上流仮締切ダム(1万m³)であり、振動ローラーを用いての締固めおよび打込み後の切断による継目施工が可能な超硬練りコンクリートの実現性が確かめられた。

続いて昭和52年には、振動ローラーの施工性をより詳しく調べるため、(財)建設機械化研究所構内で各種の振動ローラーについて野外でコンクリートを締固め、その効果の比較を行った。

これらの成果を反映して島地川ダム(高さ89 m、堤体積31.7万m³、昭和53.9~昭和55.4)本体への適用が決定され、実際に使用する材料を用いて島地川ダムサイトで現場施工試験が繰り返された。

島地川ダムは洪水吐ゲートを設けない自然調節ダムであり、堤内構造物が比較的少ないこと、中規模ダムとして標準的な形状であること等がRCD工法採用の理由であった。

このダムの施工での成果は骨材分離への対応方法である。つまり当初、ダンプトラックからの荷降しなど現場で敷きならすまでの荷替えのために骨材分離が生じ、そのまま締固めることからポーラスな箇所が生じたが、ブルドーザーによって厚さ15~20 cmの薄層で敷きならすことによってこれを解消した。この方法により基礎岩盤から40 mまではリフト厚50 cm、それ以上は70 cmで施工し、所要の品質を得ることができた。

次に採用されたのは大川ダムのマット部(昭和54.7~昭和55.7)である。このマット部は基礎岩盤のせん断抵抗力が小さいことに対処するため設けられたもので、長さ180 m、平均幅80 m、厚さ20 m、体積約30万m³と施工面積が広く、またコンクリート輸送方法にダンプトラックによる直送方式が容易に採用できるなど、RCD工法の特徴を最も発揮できる条件を備えていた

め、30万 m^3 を9か月で打設することができた。

しかし、これらの施工を通してリフト厚の増加と最大骨材粒径の増大などの課題が残された。

これらの課題解決への1段階として引続き新中野ダムの減勢池基礎（長さ35m、幅25m、高さ18m、体積1.3万 m^3 、昭和55.5~10）にRCD工法が採用された。

この基礎コンクリートの主目的は不等沈下の防止であり、所要圧縮強度が30 kg/cm^2 と低く、必ずしも高品質のコンクリートを必要とするわけではないことから、各種の試みを行うのに適していた。すなわち、それまでのRCD工法では材料分離を少なくするため、骨材最大寸法 G_{max} を80mmとしていたが、これを従来ダムのコンクリートで多用されている150mmとし、またリフト厚を1m（施工実験では1.5mも実施）に増加させた。

その結果、 G_{max} 80mmと150mmを用いたコンクリートの品質に大きな差はなく、リフト厚1mについても今後の可能性を示し、次の玉川ダム（高さ100m、堤体積114万 m^3 、工事中）での本格的な採用への足掛かりをつかむことができた。

玉川ダムのサイトの地形は、河床幅が約200mと広いU字形の谷で、堤体積が大きく打設面積が広いことからRCD工法に適したダムである。

このダムにおいては、これまでのRCD工法の経験で得られた知見を総合的にとり入れるとともに、さらに合理化を追究した。すなわち、単位セメント量、細骨材率、振動ローラによる転圧回数、ダンプトラック走行が圧縮強度に及ぼす影響、あるいは超硬練りで単位水量の値によって品質が非常に影響されやすいことに基づく降雨量、日照時間、圧縮強度との関係等の確認に加え、 $G_{\text{max}}=150\text{mm}$ の採用およびリフト厚を島地川ダムの50cm、70cmから75cm、100cm（基礎岩盤から39m以上）に増加させ合理化をはかった。また、堤内構造物が複雑に配置されるとその構造物の施工に合わせて全体が打ち上がっていくため打設工程に大きな支障となるので配置等に配慮し、たとえば型枠をプレキャスト化したり、監査廊に段差をつけるなど工夫した。

コンクリート運搬方法については、島地川ダムでの「13.5t固定ケーブルクレーン+ダンプトラック」方式や大川ダム、新中野ダムでのダンプ直送方式を含め種々検討した結果、「インクライン（9 $\text{m}^3 \times 2$ 基）+20t固定ケーブルクレーン+ダンプトラック」方式を採用したことも特徴といえよう。

玉川ダムはRCD工法によるダムとしてはこれまでにない大規模なものであり、RCD工法の技術は一層高められ、ここでの成果は後続地点へ反映された。

玉川ダムに続いて現在建設中のダムには、福島県の真野ダム、富山県の朝日小川ダム、境川ダム、山形県の白

水川ダム、北海道の美利河ダムがあり、計画中のダムもいくつか挙げられている。今後もダムサイトの地形、堤体規模、堤内構造物その他の条件がRCD工法に有利な地点については採用されていくものと考えられる。

一方、今後検討を続けるべき課題もある。その主なものとして、転圧エネルギーとコンクリートの締固めメカニズムおよび強度との関係の把握、打継目の効率的な処理、より簡便で合理的な品質管理方法の確立などが挙げられる。

（4） その他の技術

RCD工法は堤体積が大きく打設面積が広いダムに適する施工方法であるが、従来配合のコンクリートを使ったダムについても現在ポンプによる方法、ベルトコンベアによる方法が検討されており、前者については長与ダム（高さ36m、堤体積5.7万 m^3 、昭和60年竣工）本体上部に、後者については大町ダム（高さ107m、堤体積77.5万 m^3 、昭和60年竣工）でのスプレッダーコンベアの一部使用、浅瀬石川ダム（高さ91m、堤体積68.9万 m^3 、工事中）減勢池水叩部等に適用され、合理化施工の試みがなされている。

また、布目ダム（高さ72m、堤体積32万 m^3 、工事中）では、スランブ3cm程度のコンクリートを全面に敷きならし、横継目を振動目地切機で設置した後内部振動機で締固めるといった工法などが検討されており、滝沢ダム（高さ140m、堤体積165万 m^3 ）でも同様の検討がなされている。このように、コンクリートダムの打設はダムそれぞれの特徴に合った合理的な方法をめざして、今後さらに検討が進められていくことが予想される。

5. おわりに

以上、主に大正時代から現在に至るまでのコンクリート施工法の変遷を単位水量、単位セメント量低減への努力を軸に述べてきたが、この間のダム技術の進歩にはめざましいものがあり、人間のたゆまぬ努力と英知には驚嘆させられる。今後ダム建設は必ずしも良好な地点に立地できなくなることが予想され、新材料、新設計法、新工法等の新技術の導入により合理的な設計・施工を旨としていくことが重要課題といえる。

参考文献

- 1) 日本の土木技術 100年の発展のあゆみ、土木学会、昭和39年刊。
- 2) 日本土木史 大正元年~昭和15年、昭和16年~昭和40年、土木学会、昭和40年刊、昭和48年刊。
- 3) RCD工法によるダム施工、国土開発技術センター、昭和56年刊。
- 4) 國分正胤：日本におけるRCD工法によるコンクリートダム施工法の開発、ダム技術、Vol. 3、増刊1、昭和60年。（1987.7.2・受付）