일본의 최신 RCD댐

시게요시 나카타키[1], 타다히코 후지사와[2], 히데키 가와사키[3]

(1) 아이치 공업 대학특임교수, 도쿄 공업대학 명예 교수, 공학박사
(2) (재) 댐 기술 센터 고문
(3) 국토 기술 정책 종합 연구소 종합 기술 정책 연구 센터 국토 매니지먼트 연구관, 공학박사

초록

댐 콘크리트의 롤러전압 공법은 1978년 10월 일본에서 선구적으로 시작되었다. 그 이후로 30년이 경과해 일본에서는 50개의 롤러전압 콘크리트 댐이 건설되고 있다. 이 롤러전압 콘크리트는 RCD(Roller compacted Dam-concrete) 공법으로 불린다. RCD 댐은 설계나 시공원리에 있어 기존의 롤러전압 콘크리트와는 몇 개의 차이점을 나타내는데 특히 지금까지의 롤러전압 콘크리트 댐보다 시공의 원활성, 안전성 및 경제성 측면에서 우수성이 확인되고 있다. 또한 RCD 댐은 기존의 콘크리트 댐과 같은 강도, 단위중량, 수밀성, 내구성을 만족해 왔다. 이 논문에서는 일본 RCD 댐의 역사와 RCD 콘크리트와 공법의 특성에 대해 기술하도록 하겠다.

키워드 : RCD, RCC, 롤러전압 콘크리트 댐, 합리화 시공, 운반

1. 개요

RCD 공법은 RCC에 앞선 최초의 롤러전압 콘크리트 공법으로 1970년대 일본 건설부에서 개발 되어졌다. 많은 RCD 댐 건설 실적을 통해 RCD 공법은 공사기간, 노무비, 환경문제의 개선과 현장 작업원의 안전성을 향상시켰다는 평가를 받게 되었다.

1.1 RCD 콘크리트와 RCD 공법의 특징

1) RCD 콘크리트는 운반성의 개선과 수화열을 억제할 수 있는 빈 배합 콘크리트이다. 일본 건설부에서는 종래의 콘크리트와 같은 강도와 단위중량을 유지하면서 새로운 배합의 개념에 근거한 RCD 콘크리트를 완성시켰다. 또한 RCD 콘크리트를 취급하기 위해 RCD 공법을 확립시켰다. 이 공법에서는 사진1과 2에 나타내듯 콘크리트를 몇 개의 얇은 층으로 타설표면에 깔고 평탄하게 한 후 롤러형 진동기로 전압을 실시한다. RCD 공법에 따르는 작업 공정에 대해서 그림1를 참고하여 아래와 같이 기술하도록 하겠다.
2) 빈 배합 콘크리트를 덤프트럭 혹은 특별한 운반 장치에 의해 배치플랜트로부터 타설현장으로 운반한다.
3) 콘크리트를 불도저에 의해 얇은 층으로 깔고 평탄화 시킨다.
4) 진동 줄눈 절단기에 의해서 횡방향 줄눈(traverse joints)을 설치한다.

5) 콘크리트를 포설한 후 진동 롤러로 콘크리트를 전압시킨다.
6) 콘크리트를 습윤 상태로 24~48시간 양생시킨다.
7) 리프트의 표면에 그린 컷을 실시한다.
8) 다음 리프트의 콘크리트를 타설하기 전에 리프트의 표면에 모르타르를 깔아 평탄화 시킨다.

RCD 공법을 위해 지금까지 여러 기계나 장치가 개발되어 콘크리트 운반 및 줄눈 설치, 포설에 활용되어져 왔으며 또한 콘크리트의 품질관리를 자동적으로 실시하기 위해 최신형의 RI(Radio Isotope) 시험기 등을 사용하고 있다.

Photo 1 - RCD construction in Takizawa dam

Photo 2 - RCD construction in Nagai dam

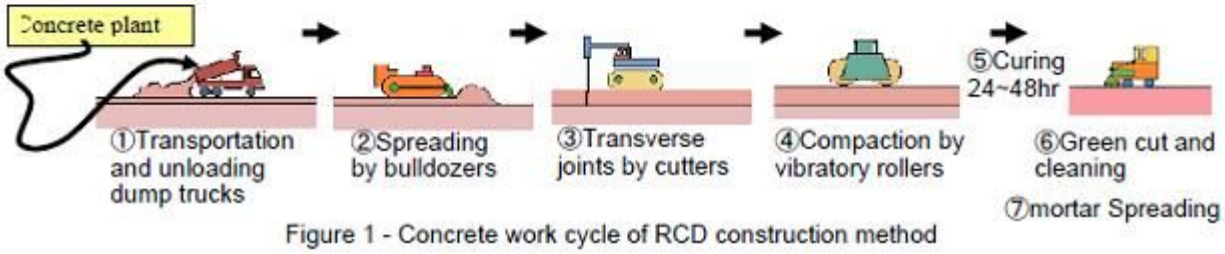

Figure 1 - Concrete work cycle of RCD construction method

1.2 RCD 공법의 철학과 배경

RCD 공법은 경제성, 안전성 및 환경 문제의 개선을 추구하면서 기존의 콘크리트 댐과 같은 성능, 같은 설계 기준 만족을 목표로 개발되었다. 그러므로 RCD 공법은 댐 시공 방법을 합리적으로 개선시키면서 기존의 콘크리트 중력식 댐과 같은 기능을 수행하기 위해 다음과 같은 특징을 갖추게 된다.

1) 온도 균열을 방지하기 위해 15 m 마다 횡방향 줄눈을 설치한다.
2) 댐의 하류면과 상류면에는 내구성과 수밀성을 확보하기 위해 고품질의 콘크리트를 사용한다.
3) 리프트 조인트의 처리는 기존의 콘크리트 댐에서 사용된 방법을 적용하여 높은 부착력과

수밀성을 확보한다.

처음 1970년대 RCD 공법을 개발할 당시 두 개의 키포인트가 있었다. 첫째는 기존 콘크리트 댐의 시공에서는 균열을 막기 위해 사진3과 같이 수축줄눈을 마련하여 블록식으로 타설을 하였다. 이러한 시공 방법은 많은 제약을 가지고 있어 개선이 필요하였다. 둘째로는 rock-fill dam 시공에 있어서 경제성이 사진4와 같이 대형기계와 상용장비의 도입으로 개선 되었다는 점이다. 결국 기존 콘크리트 댐 시공에 있어 문제점을 개선하고 rock-fill dam 시공에 적용된 것과 같은 대형 기계장비를 사용함으로써 RCD 공법은 다른 댐 공법에 비해 시공의 효율화를 실현하고 있다. 그렇지만 사진3과 같은 블록식 공법은 소규모 댐에서 아직도 주류로 사용되고 있으며 이는 RCD를 적용할 정도로 내부 콘크리트의 양이 많지 않기 때문이며 또한 연약 지반의 경우 rock-fill dam이 여전히 장점을 가진다.

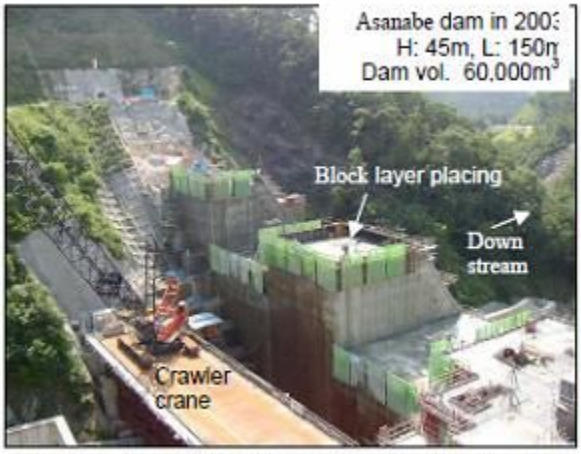

Photo 3 – Block layer placing in a small scale dam

Photo 4 - Mechanized latest rock-fill dam

1.3 RCD와 RCC의 비교

ACI 116의 정의에 의하면 RCC는 롤러로 전압 된 콘크리트를 뜻하며 이러한 관점에서 RCD는 RCC의 한 가지 종류라고 할 수 있다. 실제 두 가지 방법 모두에서 기술적 노하우나 사용기기 및 시공순서 등에서 많은 공통점을 가지고 있다. 그러나 RCD 공법은 댐 시공에서 품질을 매우 중요하게 인식하고 있다. 예를 들면 RCD 공법에서는 전형적으로 콘크리트를 몇 회에 나주어 불도저로 얇게 평탄화 시키고 진동 롤러로 전압을 실시한다. 얇은 층을 여러 번에 나누어 포설하는 것은 두꺼운 리프트 타설을 가능하게 하는 주요인이다. 한편 RCC에서는 콘크리트를 불도저로 포설하고 그때마다 진동롤러로 전압을 한다. RCD 공법에

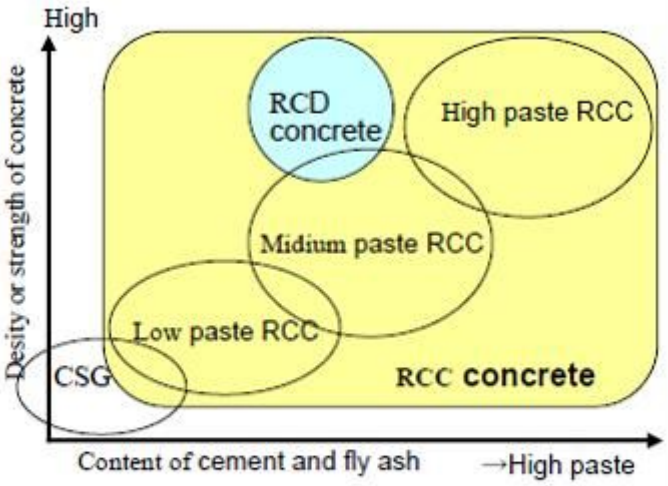

Figure 2 - Conceptual position of RCC & RCD concrete
CSG: Cemented Sand and Gravel, new material for dams

서 두꺼운 리프트의 전압을 실시하는 이유는 연속된 리프트 간의 취약점 수를 감소시키면서 지진이나 다른 재해에 의해서 드물게 발생하는 중대한 손상을 고려했기 때문이다. 표1은 여러 종류 댐 콘크리트의 특징을 나타낸 것으로 방법들 간에 콘크리트의 차이를 확인할 수 있다. 또한 그림2는 단위시멘트량과 단위중량 및 강도의 관련성에 주목해 RCC와 RCD의 관계에 대해 나타낸 것이다.

이러한 내용을 전체적으로 고려할 때 RCD는 RCC 기술 중에서 중요한 위치를 차지하고 있는 것을 알 수 있는데 이는 RCD 공법에서는 사용재료에 의존하는 것보다 콘크리트를 잘 혼합하고, 견고하게 다져 높은 품질을 유지하기 때문이다. 그러므로 RCD 공법은 RCC공법보다 높은 수준에 있다고 말할 수 있다.

한편 RCD의 설계는 안전성이나 내구성을 중시하여 이루어져야 한다. 이것은 일본이 지진이나 홍수와 같은 자연재해가 자주 발생하는 지역이며 댐 하류지역에 주로 산업지역이나 도시지역이 놓여져 있기 때문이다. 또한 사회 전반적으로도 일본에서는 고품질시공과 안전한 시설을 추구하고 있다.

추가적으로 비용적 측면에서 RCD는 여러 가지 합리적인 방법을 추구하고 있으며 비용절감을 위한 많은 노력들이 계속적으로 이어질 것이다.

Table 1 - Comparison between RCD and the other types of concrete (internal zone)

	Conventional dam concrete in ELCM*	RCD concrete	High paste RCC concrete	RCC in Kinta dam**
Property of concrete	dry lean concrete	extremely dry lean	High paste concrete	High paste concrete
Unit content kg/m^3 W: water, C: cement	W=105~115kg/m^3 C=130~160kg/m^3	W=80~105kg/m^3 C=110~130kg/m^3	W=100~150kg/m^3 C=150~300kg/m^3	W=150kg/m^3 C=200kg/m^3
F/C+F: fly ash ratio	20~40%	20~40%	≧50%	50%
Max size of aggregate	80~150mm	80~150mm	Mostly 40~65mm	63mm
s/a :sand/aggregate	25~30%	28~34%	Higher than RCD	41%
Consistency test	Slump value: 2~4cm	VC value:10~25sec	VB value: 10~17sec	VB value: 12~17sec
Air content ratio	3~4 ±1%	1.5 ±1%	lower than RCD	0%
Compaction machinery	Immersion vibrators	Vibratory rollers	Vibratory rollers	Vibratory rollers
Thickness of a lift	1.0m/1.5m	0.75m/1.0m	0.3m~0.4m	0.3m (slope layer)
Transverse Joint	Block formed by 15m span	Cut by 15m span using joint cutter	Cut by 15~60m span using joint cutter	Cut by 20m span using joint cutter
Lift Joint treatment	Green cut +cleaning + mortar spreading	Green cut + cleaning + mortar spreading	Nothing to do until setting start	Nothing to do in 5hr after placing
External concrete zone	conventional dam concrete	conventional dam concrete	High paste concrete or PVC sheet	High paste concrete (grout enriched RCC)

*ELCM: Extended Layer Construction Method, ELCM is more popular to middle or small scale dams than RCD in Japan.
**Kinta dam is constructed in Perak state, Malaysia. (H: 92m, L: 780m, dam vol: 980,000m^3, RCC term: 1.2003~6.2006)

2. 개발로부터 30년 일본 RCD 댐의 역사

1970년 당시 댐의 합리적 시공에 관한 조사가 일본에서 시작되었다. 그 중에서도 「콘크리트 댐의 합리화 시공 검토 위원회」가 1974년에 일본 건설성에 의해서 설립되어 폭넓은 연

구가 이루어졌다. 위원회의 기본적인 취지는 「노동 임금의 증가, 암반 기초의 악화가 콘크리트 중력식 댐의 시공을 증가시켜 왔고, 콘크리트 단가의 감소에 대해 검토」 하는 것이었다. 위원회에서의 총괄적인 조사나 연구 결과 일본 건설성은 여러 가지 대형화 범용화한 기기를 사용한 효율적인 공법으로서 RCD 공법을 확립했다.

RCD 공법은 최초로 시마지와댐(표2의 No.1, 사진5), 오카와댐(표2의 No.2)에 적용되었다. 두 댐 모두 RCD 콘크리트의 타설을 1980년에 완료하였다. 그 이후 RCD 공법은 타마 카와 댐(표2의 No.4)에 적용되었으며 이러 한 댐 시공 실적은 댐 공사에 있어 RCD 공법의 우수성을 입증하게 된 기회라고 할 수 있다. 이후 1980년대 후반 RCD 공법은 많은 댐에 적용되었다(표2의 No.5-14). 이 때 당시 RCD 공법의 발전은 진동롤러의 개선과 새로운 콘크리트 운반 시스템의 보급으로 가능하게 되었다. 그 외의 관련 연구로는 콘크리트 수화열 제어, 품질관리 그리고 줄눈설치장비와 프리캐스트 주변 부 처리 기술의 발전으로 이어져갔다. 1990년대에는 류먼 댐(표2의 No.15), 미야가세 댐 (표2의 No.21), 우라야마 댐(표2의 No.25), 갓산 댐(표2의 No.30), 오리가와 댐(표2의 No.35), 츄우베쯔 댐(표2의 No.36)이라고 하는 대규모 댐의 시공에 의해 RCD 공법의 기술적인 완성도가 향상되었다. 동시에 RCD 공법은 많은 중규모 댐에 적용되어 중규모로부터 대규모로 도달할 때까지 RCD 공법의 이점이 확인되었다. 2000년 이후 타키사와 댐(표2의 No.44)과 나가이 댐(표2의 No.45)에서 몇 가지 중요한 진보를 이룰 수 있었으며 오늘날에는 가세카와 댐(표2의 No.48)이나 그 외 댐들에서 장래 지속 가능한 댐 기술 분야의 진보를 이루고 있다.

Photo 5 - Shimajigawa dam (first RCD in 1978)

표2에서는 RCD 콘크리트의 타설이 개시된 1978년 이후 30년에 걸쳐 일본에서 시공된 50개 RCD 댐의 개요를 나타내고 있으며 이들 댐들은 아직도 잘 운영되고 있다.

Photo 6 - Miyagase dam (biggest RCD, completed in 2000)

Photo 7 - Origawa dam (completed in 2004)

Table 2 - List of RCD dams in Japan (Mainly described on concretes, Numbers are allotted by RCD works starts)

No.	Dam name	Area **	Term of RCD placing	Dam height :m	Dam volume :m^3	One lift		G_{max} mm ***	RCD Unit content: kg/m^3				s/a ***** :%	Trans-porta-tion
						Lay-ers	Lift :cm		Water	C+F ****	F/C+F:%	Sand		
1	**Simajigawa**	7	1978-80	89.0	317,000	4	70	80	105	120	30	752	34	CC
2	**Ohkawa***	4	1979-80	75.0	900,000	3	50	80	102	120	20	686	32	DT
3	Shinnakano*	1	1980	74.9	202,000	4	70	80	95	120	30	689	32	DT
4	**Tamagawa**	2	1983-86	100.0	1,150,000	4	100	150	95	130	30	657	30	IC
5	Mano	2	1985-87	69.0	218,700	3	50	80	103	120	20	735	33	IC
6	Siromizugawa	2	1985-88	54.5	315,333	3	50	80	102	120	20	673	31	DT
7	Asahiogawa	4	1986-88	84.0	361,000	3	50	80	94	120	20	711	32	DT
8	Asari	1	1987-90	73.9	514,006	3	50	80	103	120	20	659	30	DT
9	Sakaigawa	4	1987-91	115.0	713,000	4	75	150	103	120	30	707	32	IC
10	Pirika	1	1988-89	40.0	870,000	3	75	80	90	120	30	661	30	DT
11	Dodairagawa	3	1988-90	70.0	374,630	3	50	80	102	120	20	725	30	IC
12	Nunome	6	1988	72.0	303,000	3	75	150	95	120	35	608	27	DT
13	Kamuro	2	1988-90	60.6	306,600	3	50	80	103	120	20	729	32	IC
14	Hattabara	7	1989-92	84.9	500,000	3	75	150	90	120	30	617	28	DT
15	**Ryumon**	9	1990-92	99.5	1,074,000	4	100	150	83	130	30	621	28	DT
16	Sabigawa	3	1990-91	104.0	590,000	3	75	150	95	130	30	655	30	TC
17	Miyatoko	2	1990-93	48.0	286,852	3	50	80	98	120	20	673	30	DT
18	Kodama	2	1991-93	102.0	571,890	3	75	80	102	130	30	668	30	IC
19	Satsunaigawa	1	1991-95	114.0	761,780	3	75	150	83	120	35	641	28	DT/TC
20	Tsugawa	7	1991-93	76.0	343,000	3	75	80	100	120	20	692	30	DT/BC
21	**Miyagase**	3	1991-94	156.0	2,060,000	3	75	150	95	130	30	652	30	IC
22	Chiya	7	1992-95	97.5	697,000	3	75	80	103	130	30	724	33	CC
23	Ohmatsugawa	2	1992-95	65.0	294,000	3	75	80	105	130	30	659	30	DT
24	Hinata	2	1992-94	56.5	231,560	3	75	80	100	120	30	727	32	DT
25	**Urayama**	3	1992-95	156.0	1,750,000	3	75	150	85	130	30	679	30	BC
26	Takisato	1	1993-97	50.0	455,000	3	75	80	88	120	30	734	32	BC
27	Yoshida	8	1993-95	74.5	304,437	3	75	80	95	120	30	656	30	IC
28	Shiokawa	3	1993-95	79.0	388,600	3	75	80	100	120	20	711	32	DT
29	Shimagawa	3	1994-96	89.5	494,300	3	75	80	100	120	20	732	32	DT
30	**Gassan**	2	1994-98	123.0	1,160,000	4	100	150	87	130	30	664	30	BC
31	Hiyoshi	6	1994-96	67.4	674,300	4	100	80	83	120	30	100	30	DT
32	Tomisato	8	1995-97	106.0	507,619	4	100	80	90	120	30	746	30	CC
33	Hayachine	2	1995-98	73.5	334,602	3	75	80	97	120	30	715	32	DT
34	Kazunogawa	3	1995-97	105.2	622,000	4	100	120	90	120	30	632	28	TC
35	Origawa	5	1996-00	114.0	742,069	3	75	150	93	130	30	635	29	CC
36	**Chubetsu**	1	1997-01	86.0	1,007,000	4	100	150	76	120	30	632	28	DT
37	Shinmiyagawa	4	1997-00	69.0	480,000	3	75	80	95	130	30	710	32	DT
38	Kubusugawa	4	1998-99	95.0	468,500	3	75	80	97	120	30	703	31	DT
39	Ohnagami	7	1998-00	71.5	362,000	3	75	80	103	120	30	710	32	CC
40	Ueno	3	1998-01	120.0	720,000	4	100	150	89	110	30	658	29	TC
41	Kutani	4	2000-02	75.8	359,449	3	75	80	105	120	30	675	30	DT
42	Fukuchiyama	9	1999-01	64.5	202,000	3	75	80	90	120	30	764	32	DT
43	Koyama	3	2000-02	65.0	531,000	3	75	80	100	120	30	662	30	DT
44	**Takizawa**	1	2001-05	140.0	1,616,808	4	100	150	85	120	30/40	708	32	CC
45	**Nagai**	2	2002-07	125.5	1,200,000	4	100	80	100	130	30	662	30	TC
46	Kido	2	2003-05	93.5	501,150	4	100	150	103	120	30	630	28	CC
47	Toppu	1	2005-08	78.4	520,269	3	75	80	86	120	30	729	32	DT
48	**Kasegawa**	9	2007-09	97.0	965,000	4	100	80	99	120	30	644	29	DT
49	Obara	7	2008.9-	90.0	573,000	4	100	80	92	120	30	631	28	TC
50	Yubari-shuparo	1	2009.5-	110.6	940,000	4	100	80	85	130	30	668	30	DT

* RCD concrete was placed in the basement of dam. **Area is shown in Figure 3.

***Gmax: max size of aggregate, ****C+F: Cemetn+Flyash, *****s/a: ratio of sand to aggregate

DT: dump truck, IC: incline, CC: cable crane, TC: tower crane, BC: belt conveyor

그림3은 RCD 공법의 가장 큰 특징 중 하나인 다양한 운반 방법에 대해 지역별로 나타낸 것으로 RCD 댐은 일본 북부 또는 동부지방에서 많이 건설되었다. 이 지역에 RCD 댐이 많이 건설된 제일 큰 이유는 겨울철 눈이나 추위에 의해 낮아지는 시공성을 회복하기 위해 여름철 콘크리트의 신속한 타설이 요구되기 때문이다. 두번째 이유로는 RCD가 대규모 댐에 적절하고 이 지역 하천 대부분이 크기 때문으로 생각된다.

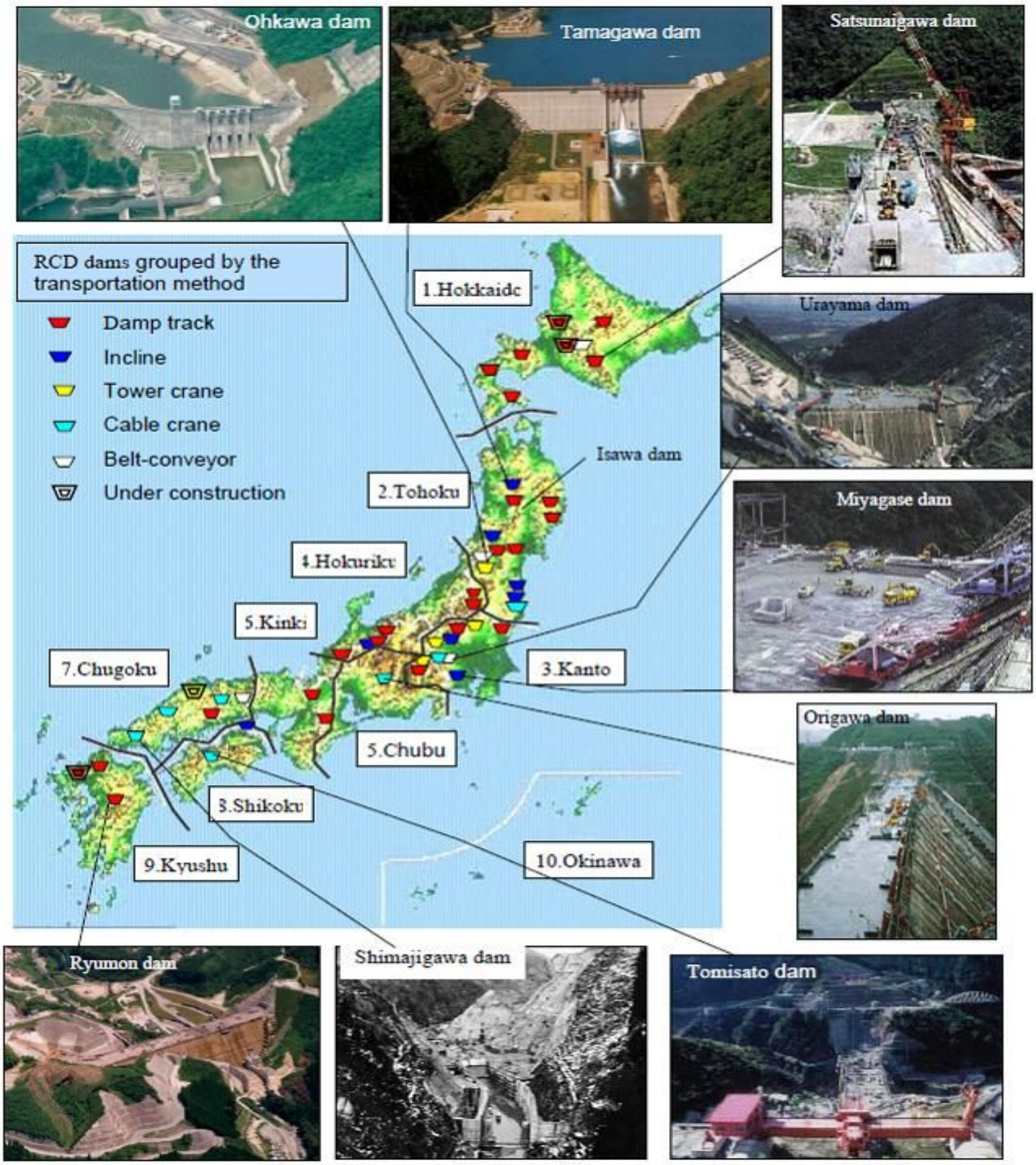

Figure 3 - Map of RCD dams in grouped by the transportation method

3. RCD 공법의 시공 계획

RCD 공법의 기본적인 시공 계획은 스케줄, 수화열 관리, 전압두께, 시공설비 능력, 현장지질 조건, 기후, 환경을 고려하여 결정된다. RCD의 시공 계획에 관한 주요사안은 아래와 같다.

3.1 RCD 콘크리트의 구역 결정

댐 표면의 상류측, 하류측은 수밀성이나 동결융해 및 그 외 열화에 대한 저항성을 확보하기 위해 고품질 콘크리트를 사용한다.

RCD 댐에서는 기존의 콘크리트 댐과 같이 댐 표면을 가리는 외부 콘크리트, 암반과 접하는 기초부 콘크리트, 댐 시설에 사용되는 구조용 콘크리트, 댐 내부에 사용되는 내부 콘크리트로 분류된다. RCD 콘크리트는 그림4에 나타내는 것과 같이 타설되는데 RCD 콘크리트의 용적은 외부, 기초, 구조용 콘크리트의 양을 제외한 것으로 계산된다.

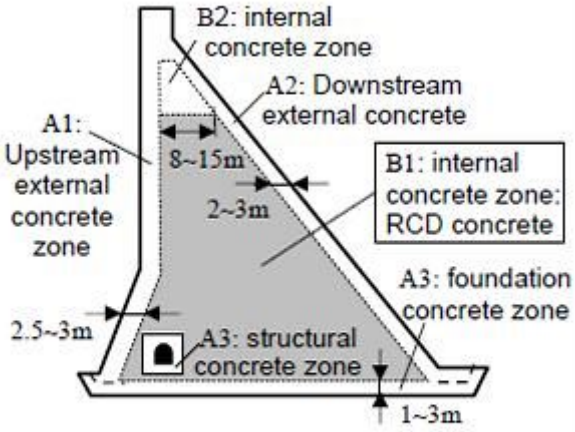

Figure 4 - Cross section of RCD dams classified by concrete mixture

3.2 리프트 계획

RCD 공법에서는 기존의 시공방법에 비해 같은 기간에 보다 방대한 콘크리트가 타설된다. 그 때문에 온도 균열을 방지하고, 효율적인 시공을 하기 위해서 적절한 콘크리트의 타설스케줄(리프트 계획)을 계획하는 것이 중요하다.

3.2.1 리프트 두께

시공의 신속화, 리프트 표면의 처리 횟수를 줄이기 위해 리프트 두께를 늘려야만 하게 되었다. 그러나 이것은 RCD의 다짐이 불충분하게 되는 위험성을 수반하게 되었다. 타마카와 댐에서는 리프트 두께로 1 m를 적용하였으며 이를 위해 불도저로 콘크리트를 4개층 포설을 실시하였다. 이를 기반으로 최근에 적용되는 RCD 댐에서는 대부분 리프트 두께를 1 m로 하여 공사 기간이나 비용을 감축하고 있다.

3.2.2 강우시 타설 중지

RCD 콘크리트는 빈배합 콘크리트이기 때문에 기존 콘크리트에 비해 강우로 인한 품질 변동이 발생하기 쉽다. 강우강도가 2~4 mm/hour 이상이나 빗물로 콘크리트 표면이 씻기게 되면 콘크리트 타설이 제한되고, 콜드 조인트의 원인이 될 수 있다. 리프트 계획을 세울 때 이러한 강우 요인도 고려해야 한다.

3.3 수화열 관리

RCD 댐에서는 파이프 쿨링을 실시하는 것이 곤란하기 때문에 계획 단계에 있어 온도 균열을 방지하기 위한 수화열 관리를 위한 검토가 필요하다.

1) 수화 발생의 억제 : RCD 콘크리트에 플라이애쉬, 중용열포틀랜드 시멘트가 사용되어 단

위 시멘트량을 줄일 수 있다.

2) 줄눈 : 줄눈 간격을 대략 15 m로 하면 온도 균열 방지에 유효하는 것이 경험상 밝혀지고 있다.

3) RCD 콘크리트의 보양 : 대부분의 RCD 댐에서는 타설기간 동안 담수나 살수에 의해 보양된다. 또한 겨울철에는 우레탄과 같은 단열재로 댐 콘크리트의 표면을 가린다.

4) 재료의 pre-cooling : 여름철에는 대부분의 RCD 댐에서 물이나 잔골재의 pre-cooling이 실시된다.

5) 그 외 중요한 사항은 콘크리트 타설을 최적 시기에 개시하는 것이며 미야가세 댐에서는 9월부터 콘크리트 타설을 시작하였다.

3.4 콘크리트 플랜트의 능력과 믹서의 선정

RCD 공법은 대량의 콘크리트 타설이 필요하므로 Batcher Plant는 신속한 타설이 가능한 것 이여야 한다. 그림5에서와 같이 RCD 댐에 있어서 Batcher Plant의 능력은 댐 용적의 증가에 따라 다른 공법보다 크 게 증가하며 이것은 RCD 댐이 수화열관리 나 운반방법, 콘크리트 타설에 있어 다른 공법에 비해 제약을 덜 받기 때문이다.

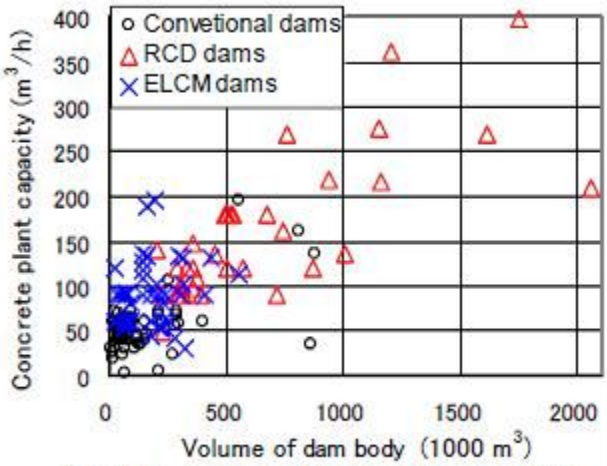

Figure 5 – Concrete plants to dam volumes

또한 RCD 콘크리트는 단위 시멘트량과 단위 수량이 적기 때문에 균질성을 얻기 위해 충분히 혼합하지 않으면 안 된다. 지금까지는 강제식, 경동식이나 중력식(사진8)과 같은 여러 가지 종류의 믹서가 사용되고 있다.

3.5 운반 방법의 선정

RCD 공법에 있어서 큰 성과는 운반 시스템을 다양화하고, 개선시킨 것이다. RCD 공법은 타설면이 평탄하기 때문에 덤프 트럭이 댐 내의 모든 타설면에서 콘크리트를 운반할 수 있다. 이것은 콘크리트 플랜트로부터 타설현장으로의 운반방법 선정에 있어 선택의 폭을 넓게 가지고, 가장 적절한 운반방법을 선정함으로써 자연 환경에 부하를 저감시킬 수 있다.

3.6 댐 본체 내부 구조의 간소화

inspection gallery, 임시 방수로 및 수문 등의 댐체 내부 구조물은 RCD 공법의 원활한 적용에 영향을 미칠 수 있다. 일본에서는 RCD 콘크리트 시공의 신속화를 위해 내부 구조 간소화를 위한 다양한 방법이 검토되었다. 예를 들면 프리캐스트 부재를 적용하거나 콘크리트 작업의 반복을 피하기 위한 gallery의 길이의 단축과 위치 변경, 임시 방수로의 위치 변경, 병목현상을 초래할 수 있는 복잡한 구조물 작업의 개선 등이 그것이다. 사진9는 현장 작업을 간소화하기 위해서 inspection gallery를 프리캐스트로 시공한 예이다.

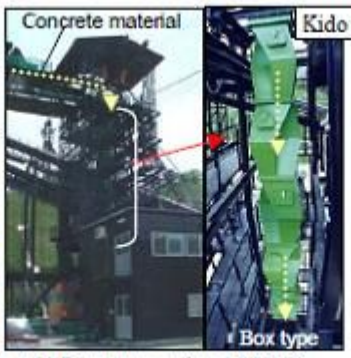

Photo 8 - Spiral type mixer (Left) and Box type mixer (right)

Photo 9 – Setting of precast gallery

4. RCD 콘크리트

RCD 콘크리트의 배합에 요구되는 사항은 기존 콘크리트와 같으며 RCD 콘크리트 배합 설계 기술은 역사를 통해 진보해 왔다.

4.1 RCD 콘크리트의 요구 사항

표2의 RCD 콘크리트 배합에 나타내듯이 RCD 콘크리트는 기존 댐 콘크리트 배합에 비해 단위 시멘트량과 단위수량이 적은 빈배합, 된반죽 콘크리트를 사용한다. 된반죽 콘크리트는 시공장비의 신규타설면 위로 이동을 위해 필요하며 빈배합 콘크리트는 온도 균열을 유발시킬 수 있는 수화열의 발생을 최소화 시키기 위해 필요하다. 동시에 경화된 RCD 콘크리트에는 기존의 댐과 같이 안전하고, 높은 수밀성을 요구한다. 많은 연구에 의해 RCD 콘크리트는 기존 콘크리트와 비교해서 동등의 강도, 단위 중량, 수밀성, 내구성에 대해 요구하는 성능을 갖춘 것으로 평가된다.

4.2 RCD 콘크리트에 이용되는 재료의 특성

RCD 공법에서는 소요강도, 단위중량, 수밀성, 내구성 확보 이외에 특히 수화열에 의한 온도 상승을 최소한으로 억제해 진동롤러로 다짐 할 수 있도록 배합을 결정할 필요가 있다. 배합 설계에 앞서 다음과 같이 재료를 선정한다.

1) 시멘트 : 저발열성 시멘트는 콘크리트의 온도 상승을 방지하기 위해 필요하며 또한 장기 강도 발현성의 측면에서도 유효하다. 이러한 점을 고려하여 일반적으로는 중용열포틀랜드 시멘트가 사용되고 있지만 저발열성 시멘트도 개발되어 왔다. 히요시 댐과 우에노댐에서는 미분말 또는 혼화 재료에 의해서 workability가 개선되어 시멘트계 재료(시멘트, 플라이에쉬)의 사용량을 110 kg/m^{3}까지 저감하는 것이 가능해졌다.

2) 골재 : RCD 콘크리트에 사용하는 골재는 종래의 콘크리트에 사용하는 골재와 동등의 품질을 보유하지 않으면 안 된다. RCD 콘크리트에 대하여 굵은 골재 최대치수가 150 mm의 골재를 이용하는 경우도 있지만 대게는 최대치수가 80 mm 인 것을 사용한다.

3) 미립분 : 일반적인 콘크리트에서는 시멘트 페이스트 또는 모르타르량을 저감시키기 위해 사용하지만 콘크리트의 재료 분리를 발생시킬 우려가 있다. 그러나 RCD 콘크리트에서는 미립분 (50μm정도의 입자 50%함유)을 잔골재에 첨가하는 것으로써 개선하는 것이 가능하다. 치야 댐에서는 미립분을 증가시키기 위해서 석회석으로부터 발생하는 미립분을 첨가하였으

며 최근의 RCD 댐에서는 골재 제조과정에서 발생하는 미립분을 RCD 배합에 투입함으로써 workability 향상에 유효하게 이용하고 있다. 또 히요시 댐과 우라야마 댐에서는 미립분량을 늘리기 위해서 건식의 골재 제조설비가 적용되었다.

4) 혼화 재료 : 혼화재나 화학 혼화제 분야의 기술력 향상에 의해 혼화 재료의 적용 범위가 확대되었다. 플라이애쉬는 일반적인 혼화재의 하나로 이용되고 있고, 시멘트량에 대해서 20%~40%가 치환되고 있다. 시멘트의 일부를 플라이애쉬로 치환함으로써 콘크리트의 온도 저감과, consistency 향상, 장기 강도 증가라는 이점이 있다. 그리고 많은 RCD 댐에서는 계절이나 배합에 따라 시멘트와 플라이애쉬를 현장에서 혼합해 사용했다. 예를 들면 여름철에는 RCD의 시멘트에 대해서 플라이애쉬를 40% 치환해 사용하고 다른 계절에는 시멘트의 30%를 플라이애쉬로 치환해 사용했다. 또 기존의 콘크리트(외부 콘크리트)에서는 여름철에 시멘트에 대해서 플라이애쉬를 35% 치환해 사용했다. 부수적으로 RCD 공법을 위해 특수 혼화제, 저발열형 시멘트가 개발되었다.

4.3 VC(Vibrating Consistency) test

RCD 콘크리트는 빈배합이기 때문에 consistency를 측정하는데 슬럼프 시험을 적용할 수 없다. 다짐에너지는 RCD의 강도를 결정 하는 중요한 요소이기 때문에 VC시험은 RCD 콘크리트의 consistency를 측정하기 위 해서 개발된 측정 방법이며 2종류의 용기 (표준형 : 직경 24 cm, 대형 : 직경 48 cm)가 이용된다. 사진10에 나타내는 표준형 용기는 굵은 골재 최대치수가 40mm 이하인 콘크 리트가 사용되어지고, 사진11에 나타내는 대형 용기는 모든 골재 크기의 콘크리트에 적용이 가능하다. 콘크리트 공시체는 이 대 형전압장치로 제작되고, 두 방법에 있어 표준시험순서는 다음과 같다.

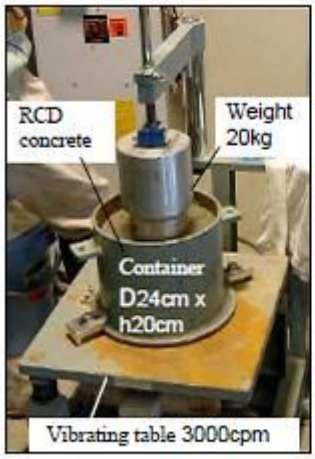

Photo 10- VC test with a standard size container

Photo 11- VC test with a large-size container

1) 먼저 콘크리트를 용기에 채워 콘크리트 표면을 수평하게 맞추고, 원반과 추를 그 위에 설치한다.

2) 진동대로 용기의 RCD 콘크리트에 진동을 준다. 진동하는 동안 콘크리트 표면에 페이스트가 떠올라오는데 원반 아래면 전체에 페이스트가 접할 때까지의 시간을 측정한다.

3) 위에 의한 측정치가 VC치가 되어 RCD 콘크리트의 consistency는 이 값에 의해서 나타난다. VC치가 10초 미만일때는 현장시공에서 진동 롤러가 가라앉으므로 전압이 곤란하게 된다. 반대로 VC치가 60초를 넘을 때는 RCD 콘크리트는 너무 딱딱하기 때문에 전압을 할 수 없다.

4) RCD 콘크리트의 VC치는 10~30초가 최적인데 이것은 20±10초의 사이로 이론 밀도의 약 97% 를 얻는 것이 확인되었기 때문이다.

4.4 RCD 콘크리트의 배합 설계

RCD 시공의 성공은 RCD 콘크리트의 배합설계에 좌우된다. RCD 콘크리트의 개발에 적용된 몇 개의 새로운 개념은 아래와 같다.

1) 단위 시멘트량

단위 시멘트량은 필요한 workability, 강도 및 다른 특성을 만족하는 범위에서 온도 상승을 억제하기 위해 가능한 최소화 한다. 대부분의 경우 RCD 콘크리트의 단위 시멘트량은 110~130 kg/m^3이다.

2) 단위 수량

단위 수량은 적절한 다짐을 얻을 수 있도록 결정한다. 단위 수량을 변화시킨 배합의 콘크리트에 대해 VC시험을 실시한다. 시험에 의해 규정된 VC치를 얻을 수 있을 때 최적 함수량이 결정되며 통상 최적 VC치는 20초로 단위 수량은 80~105 kg/m^3이다. 그림6은 단위 수량과 VC치의 관계를 나타낸 것이다.

3) 잔골재율

잔골재율은 RCD 콘크리트 배합에 균일한 품질을 얻기 위해 중요한 요소이다. 최적잔골재율은 VC치가 최소가 될 때의 잔골재율로 RCD 콘크리트의 잔골재율은 약 30%로 여겨진다. 기존의 콘크리트와 비교하면 RCD 콘크리트의 잔골재율은 더 낮다. 콘크리트 배합에서는 대형용기에 의한 VC시험을 실시하며 이 시험에서 단위 시멘트량, 단위 수량은 일정하게 유지하고, 잔골재율을 변화시킨다. 그림7은 대형용기를 이용했을 때 잔골재율과 VC치의 관계를 나타낸 것이다.

4) 강도와 표면 외관

RCD 콘크리트의 강도와 표면 외관은 대형 용기로부터 코어직경 150mm콘크리트 공시체를 이용해 평가한다. 그림 8은 단위 수량과 압축강도의 관계를 나타낸 것으로 단위 수량이 낮을 때에 강도가 저하하는 이유는 밀도가 저하하기 때문이다. 이것은 4.5절에서 자세하게 언급하도록 하겠으며 이러한 이유로 RCD 콘크리트의 단위 수량과 잔골재율을 결정하기 위해서 VC치는 중요한 지표가 되었다.

4.5 콘크리트와 모르타르의 공극율

최적 혼합비를 찾아내기 위해 계수α,β의 개념이 도입되었다. 잔골재의 공극에 대한 시멘트 페이스트 용적 비율을α, 굵은 골재의 공극에 대한 모르타르 용적의 비율을 β라고 정의했다. 굵은 골재와 잔골재의 공극을 모르타르 또는 페이스트로 채우기 위해서는 α, β 모두 1이상으로 해야 한다. 이α, β의 개념에 의하면 기존 댐 콘크리트에서는 α=1.5~1.8, β=1.2~1.5, 구조용콘크리트에서는 α=2.1~2.4, β=2.0~2.3, RCD에 대해서는 α=1.1~1.3, β=1.2~1.5이다. 특히 시멘트 페이스트 용적은 잔골재의 공극량에 가깝게 된다. 이 결과 시멘트계 재료(시멘트와 플라이에쉬)의 단위량은 110~130 kg/m^3의 범위에서 단위 수량은 80~105 kg/m^3의 범위에 있는 것으로 나타났다.

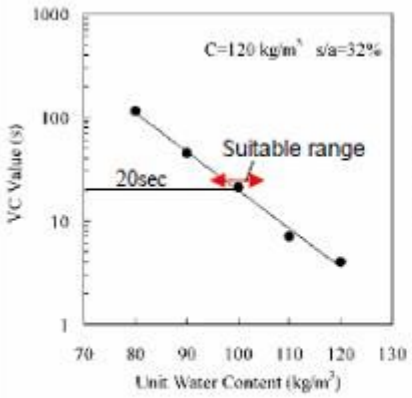

Figure 6- Unit water content to VC value

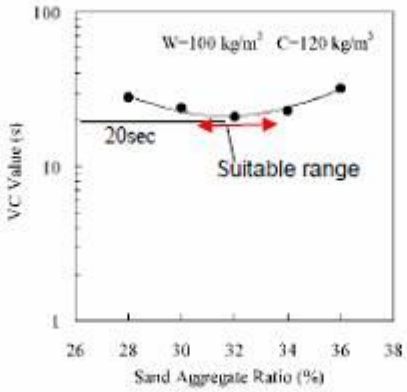

Figure 7- Sand aggregate ratio to VC value

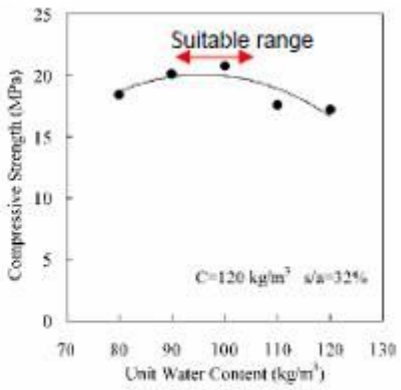

Figure 8 - Unit water content to compressive strength

5. RCD 콘크리트의 운반 시스템

종래의 주요한 콘크리트 운반 설비는 콘크리트를 적재한 버킷을 케이블에 매달아 그 케이블을 대안까지 연결시킨 케이블 크레인이었다. 이 케이블은 양안에 부설된 레일 위를 이동하는 주행형 타워에 의해 상류 또는 하류로 이동한다. 이것을 이용하면 광범위한의 타설장소 어디든 콘크리트를 운반할 수 있다. 하지만 케이블 크레인은 장대계곡에 있는 경우에는 공사가 곤란하고, 1 cycle의 시간이 길어 운반 능력도 제한된다. 게다가 레일의 부설에 방대한 굴착이 필요하며 이것은 경제성과 환경 측면에서는 매우 불리하다.

다른 운반 설비에서는 크기와 운반 능력에 한계가 있다. 예를 들면 타워 크레인의 붐길이가 짧은 경우에는 여러 대의 크레인이 필요하다. 결국 콘크리트의 운반에 관한 가장 큰 과제는 보다 많은 콘크리트를 모든 타설 범위에 어떻게 하면 효율적으로 공급할 수 있는가 하는 것이다.

RCD 콘크리트는 타설면 위로 콘크리트를 운반하는데 덤프 트럭의 사용을 가능하게 했기 때문에 주요 운반장비로 콘크리트 플랜트로부터 타설면까지의 운반만을 고려하면 된다. 이것은 서징 호퍼(surging hopper, 콘크리트를 덤프트럭으로 이동시키는 장비)와 함께 사용되는 incline, belt conveyor나 복합 케이블 등의 사용을 가능하게 하였다. 이것은 또한 간이형 타워 크레인의 사용과 덤프 트럭을 사용하여 콘크리트를 직접 운반하는 것도 가능하게 했다. 이와 같이 RCD 콘크리트에서는 운반 수단에 대해 많은 선택사항을 이용할 수 있다.

5.1 덤프 트럭(직접 운반방법)

운반 중의 재적재나 다른 운반 설비를 필요로 하지 않는 적절한 지형 상태이면 플랜트로부터 타설면으로 덤프 트럭에 의한 직접 운반은 가장 유효한 방법이다. 덤프트럭에 의한 직접 운반은 댐 저층 부분에서 주로 이용된다. 이 직접 운반 방법은 초기 RCD 댐의 하나인 오카와댐에 적용된 바 있다. 비리카댐과 룽먼댐(그림3)은 콘크리트 댐과 rock-fill dam의 복합 형식으로 그 지형적 특징에 의해 콘크리트 부분에는 덤프 트럭에 의한 직접 운반 방식의 RCD공법이 적용되었다.

댐체 도로는 축제형으로 설계되어 길이 30 m, 폭 4 m로 50 cm 마다 높이를 조정 가능한

임시 교량에 의해 접속이 가능하다. 이 덤프트럭에 의한 직접 운반 시스템은 RCD 댐의 주류가 되고 있다(표2).

5.2 Incline 시스템

Incline은 급사면에 적용되어 대량의 콘크리트를 운반할 수 있는 방법으로 지형에 영향을 받지 않고 비교적 대규모 RCD 댐에 채용되는 경우가 많다. Incline 운반 시스템에 의해 건설된 댐으로서는 타마카와 댐(사진14)이나 미야가세 댐(사진15) 등이 있다.

5.3 Cableway 및 Tower crane

Tower crane이나 Cableway형 크레인과 같이 버킷 형식에 의한 콘크리트 운반은 3 차원적 운반이 가능하다. 이 방법은 강바닥의 지형에 영향을 받지 않고 조작이 간단한 특징이 있다. 고정식 cableway는 초기의 RCD 댐의 하나인 시마지와댐에서 적용되었고, 사비가와댐에서는 13.7톤급의 타워 크레인 2기를 좌우의 경사면에 설치하여 댐 건설 지역의 환경 변화를 최소화했다. 추가적으로2대의 grand hopper를 설치하여 grand hopper로부터 덤프트럭에 의해 타설 지점까지 콘크리트를 운반했다.

오리가와 댐(사진7)에서는 토미사토 댐과 같은 RCD 운반 시스템으로 20톤급의 양측 주행형 케이블 웨이식 크레인을 설치하였다. 이 케이블 크레인은 댐 축 방향 뿐만이 아니라 하천방향으로 약 15 m 운반을 가능하게 했다. 타마카와 댐(사진1)에서는 모노레일 위에 5개 회전식 버킷을 설치하고 콘크리트를 자동 공급해 3개의 고정 케이블 크레인에 의해 선택한 최단 루트로 타설현장 hopper까지 자동 운반을 실시하는 자동 수송 시스템을 도입했다.

나가이 댐(사진17)에서는 붐길이가 짧은 2기의 타워 크레인으로 대량의 콘크리트를 신속하고 경제적으로 운반했다.

5.4 벨트 컨베이어

벨트 컨베이어는 높은 댐 시공에서 중요한 운반 시스템이다. 츠가와댐, 우라야마 댐(그림3 참조) 갓산 댐(Photo18 참조)에서는 벨트 컨베이어가 콘크리트의 운반에 이용되었다. 벨트 컨베이어에 의해서 batcher plant로부터 운반된 콘크리트는 댐 현장의 grand hooper에 임시로 두고 타설장소로는 덤프 트럭으로 옮겨진다.

Photo 12 - Dump Truck, Kutani dam, 2002

Photo 13 - Dump Truck, Toppu dam, 7.2005

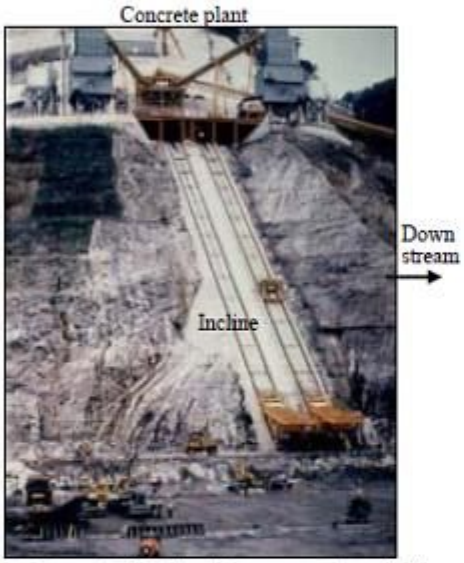

Photo 14 - Incline, Tamagawa dam, 1984

Photo 15 - Incline, Miyagase dam, 1992

Photo 16 - Tower crane, Ueno dam, 11.1998

Photo 17 - Tower crane, Nagai dam, 5.2005

Photo 18 - Belt conveyor, Gassan dam, 1995

6. RCD 공법의 콘크리트 공사

빈 배합 된 반죽의 RCD 콘크리트를 진동 롤러에 의해 다짐을 위해서는 기존의 유슬럼프 콘크리트와 비교해서 보다 많은 경험과 기술을 필요로 한다. 이 때문에 RCD 공법으로의 콘크리트 공사는 일본에 있어서 많은 RCD 댐의 시공 실적을 통해서 개선되고 있다. 이 기술들은 이미 RCC공법에 적용되고 있는데 예를 들어 모르타르 포설, 콘크리트 다짐, 조인트부 처리, 다른 콘크리트와의 접합부 처리, 다양한 기계와 장비들의 적용이 그것이다. RCD 공법에 있어서의 콘크리트 시공의 순서는 사진19에 나타낸 것과 같다.

a. RCD works by cable crane
b. Spreading mortar
c. Concrete unloading
d. Spreading by bulldozer
e. Compaction by vibrating roller
f. Cutting of transverse joint

Photo 19- Concrete work cycle of RCD construction method in Kido dam, 8.2005

6.1 RCD 콘크리트 공사의 시험 시공

RCD 콘크리트 공사의 시험 시공은 배합설계의 검증과 현장 상황에 적절한 다짐방법을 결정하기 위해서 이루어진다. 시험 시공은 실제 현장 상황에 맞추어 실시해야 하는데 상류가물막이와 하류가물막이의 기초부에 주로 실시한다. 특히 RCD 콘크리트에서는 두꺼운 층을 충분하게 다지지 않으면 안 되기 때문에 몇 번이고 시험시공에 의해서 100 cm를 넘는 두께의 리프트를 적절히 다짐하는 방법을 찾아가야 한다. 그러므로 시험 시공의 중요한 성과는 불도저에 의해 부설하고, 진동 롤러로 다짐하는 RCD 기술을 습득하는 것이라 할 수 있다.

Photo 20- Lift joint treatment: mortar spreading

6.2 그린 컷 및 모르타르 포설에 의한 이음매

처리
각 리프트 표면상에서는 리프트 이음매가 구조상의 약점이 되지 않게 motor sweeper에 의해 그린 컷을 실시한다. RCD 콘크리트의 그린 컷 시간은 콘크리트 경화 시간부터 결정된다. 여름철에는 통상적으로 콘크리트 타설 후24-36시간, 겨울철에는36-48시간 후에 실시하며 다음 리프트의 RCD 콘크리트를 포설하기 전에 수평 방향의 리프트 이음매에 양호한 부착력 확보를 위해 물을 제거하고 모르타르를 포설한다. 표준적인 포설 모르타르의 두께는 1.5 cm 이다(사진19b, 20 참조).

6.3 덤프 트럭에 의한 콘크리트의 하역

균질인 RCD 콘크리트는 덤프 트럭에 의해 타설지역까지 운반된다. 그러나 RCD 콘크리트를 덤프 트럭으로부터 콘크리트를 하역할 때 콘크리트의 재료분리가 일어나기 쉽다(사진19c). 그래서 다양한 방법들을 적용해왔는데 덤프트럭 게이트에 hatch를 설치하거나 2개의 파일 안에 콘크리트를 하역하는 것으로 이러한 문제에 대응하기도 했다.

6.4 RCD 콘크리트의 타설

RCD 공법에서는 불도저에 의해 콘크리트를 얇게 포설하고 평탄화 한다. 각 층은 20~30 cm 정도의 두께로 포설하고, 3개 내지 4층을 하나의 레이어로 다지게 된다(사진19d, 21 참조). 리프트 두께가 100 cm 인 경우 4층이 1 리프트를 형성하게 된다. RCD층간의 타설 간격으로서는 2시간 이내에 다음 층 콘크리트를 포설해야 하며 불도저에 의해 콘크리트를 얇고 평탄하게 포설하는 것은 RCD 콘크리트의 분리를 방지하는데 효과적이다. RCD 콘크리트를 너무 두껍게 포설할 경우에는 콘크리트 재료분리가 쉽게 일어날 수 있으며 충분한 다짐도 실시할 수 없다. 또한 불도저에 의해 콘크리트를 포설하는 것은 진동 롤러에 앞서 콘크리트를 다지는데 효과적이다. RCD 공법의 레이어 포설 방법은 각 층의 콘크리트 다짐을 적용하는 RCC 공법의 다짐과는 다른 것으로 기존 콘크리트 댐 건설에 이용되는 것과 같이 두꺼운 리프트의 타설은 리프트 표면상에 약한 면의 형성을 방지한다.

6.5 RCD 콘크리트의 전압

RCD 콘크리트는 진동 롤러에 의해 다져진다.(사진19f, 21 참조). 다짐은 혼합 후 장시간 경과하면 적절한 다짐을 실시하는 것이 곤란해지기 때문에 가능한 신속하게 실시한다. 최근의 시공된 RCD 댐인 오하라 댐을 참고하여 나타내면 다음과 같다.

1) 진동 롤러의 종류 : RCD 개발 당시 7 t자주식 진동 롤러가 일반적으로 이용되었다. 그러나 최근에는 11 t타입의 진동 롤러가 빈번히 이용된다. 표준 이동속도는 시속 1 km/hr 이다.

2) 전압공정 : 리프트가 50 cm 인 경우 진동 롤러는 진동을 주지 않고 콘크리트 위를 1회 왕복 다짐하고, 진동을 주어 적어도 3회 왕복 다짐한다. 리프트가 100 cm 인 경우 진동 없이 1회 왕복 다짐 후 최소 6회 진동 다짐한다.

3) 마무리 공정 : 타이어 롤러가 진동으로 3회 왕복 다짐한다.

4) 다짐방향과 폭 : 콘크리트 포설과 다짐은 일반적으로 댐의 축방향을 따라서 7-8 m 폭으로 실시하고, 다짐 폭은 20-30 cm정도 중복 시킨다.

5) 다짐시간 한계 : 콘크리트의 혼합으로부터 장시간 경과하면 다짐 작업이 제한된다. 이 때문에 신속하게 다짐을 실시하지 않으면 안 된다. 일반적으로는 콘크리트를 포설하고 나서 여름철에는2~4시간, 다른 계절에는3~5시간 안에 다짐을 실시하고 있다.
6) 콘크리트 표면상의 이동 제한 : 타설을 완료하고 나서 6시간 안에는 콘크리트 표면 위로 덤프 트럭 주행이 제한된다.
사진22는 충분히 전압 후의 RCD 콘크리트 표면이며 이러한 면에는 레이턴스나 블리딩이 거의 발생하지 않는다.

Photo 21- Spreading and compaction in RCD concrete

Photo 22- RCD concrete after compaction

Photo 23- Contraction Joint in upstream side

Photo 24- Block forms along the placing end

6.6 수축 줄눈
댐의 상하류단에서는 수축 이음매로서 15 m간격으로 아연 도금 철판을 미리 설치한다. 그 후 지수판과 PVC배수관을 상류측의 철판 내에 설치한다(사진23 참조). 수축줄눈은RCD 콘크리트 포설 후 온도 균열을 방지하기 위해 도입되는 것으로 진동 커터로 콘크리트에 절단면을 형성하고, 절단면이 닫지 않게 아연 도금 철판을 설치한다(사진19e 참조).
여러 횡줄눈에 의해 형성된 RCD 콘크리트 타설 중단선을 따라 콘크리트 블록이 생기게 된다. (사진24 참조).

6.7 다른 콘크리트간의 다짐

내부 RCD 콘크리트는 외부 유슬럼프 콘크 리트의 뒤에 타설한다. RCD 콘크리트와 기존 콘크리트의 접합부는 그림9와 같은 방법에 의해 충분히 다짐한다.

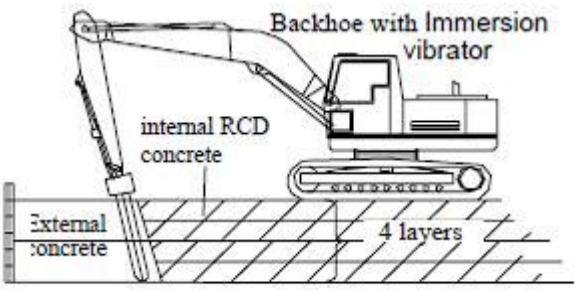

Figure 9 - Compaction between different concretes

6.8 보양

RCD 콘크리트의 타설 후 적절한 온도와 습윤 상태로 충분히 양생한다. 담수나 스프링클러에 의한 습윤 양생이 일반적으로 행해져 RCD 콘크리트 위에 스프링클러로 살수를 하기도 한다.

6.9 품질관리

RCD 댐에서는 재료의 품질을 주의 깊게 확인할 필요가 있으며 이를 위해 여러 가지 품질 관리 시험이 실시된다. 다짐 후에 콘크리트 밀도를 측정하기 위해 RI시험기가 이용된다.

1) 콘크리트 강도 : RCD 콘크리트의 강도를 확인하기 위해 압축 강도 시험을 1일에 1, 2회 실시한다. RCD 콘크리트의 강도와 그 외의 품질은 댐 본체로부터 채취한 코어로 확인한다.

2) 밀도 : 콘크리트의 다짐을 확인하기 위해 진동 롤러의 통과 회수, 방사성 RI밀도계, 다짐 콘크리트의 침하량 등을 검사한다. 특히 다짐 후 RCD의 품질을 관리하기 위해 매입형의 RI 밀도계를 이용한 밀도 관리를 한다(사진25) 이러한 측정에 의해서 불충분한 다짐이 생기는 일 없이 두꺼운 리프트의 타설이 가능하게 된다.

Photo 25- Concrete density measuring by RI meter

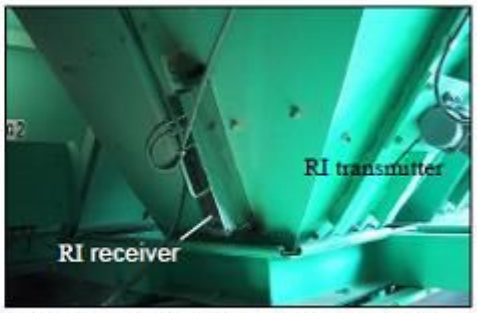

Photo 26- Sand water content measuring by RI meter

3) 함수량 : 표면수율과 골재 분포는 RCD 콘크리트의 consistency에 영향을 미치기 때문에 특히 주의 깊게 감시할 필요가 있다. 잔골재의 표면수 변동이 크면 RCD 콘크리트의 consistency 관리가 힘들게 된다. 따라서 잔골재의 표면수율은 함수율계를 이용해 가능한 일정하게 유지해야 한다(사진26 참조).

4) Consistency : RCD 콘크리트의 consistency를 측정하기 위해서 표준용기를 이용한 VC시험이 실시된다. 이 시험은 12시간 간격으로 실시한다.
5) 온도 : 콘크리트의 배합온도는 온도규정에 따라 타설 가능여부를 확인하기 위해서 정기적으로 측정된다. 필요할 경우 온도계를 댐체에 묻는 경우도 있다.

7. RCD 공법에서의 새로운 접근

7.1 가세카와 댐의 외부 콘크리트 합리화

가세카와 댐은 최신 RCD 댐의 하나이며 기초 콘크리트를 타설 중이다. 현재 댐의 중간층보다 높이 있는 부분에 대한 신속한 타설을 위한 RCD 시공 방법 개선이 진행 중이다. 이 신기술에 대해 기본 전제가 되고 있는 사항은 다음과 같다.
1) 내진상의 약점이 되기 쉬운 층간 이음매를 줄이기 위해 1층의 두께를 75-100 cm로 한다.
2) 일본에서 지진 특성을 고려해 각층을 완전하게 접착할 수 있는 그린 컷과 모르타르 부설을 모든 면에 있어서 실시한다. 이 전제에 근거해 기존 방법에서는 외부 콘크리트를 내부 RCD 콘크리트 전에 타설하고 있다. 그러나 새로운 방법에서는 외부 콘크리트의 타설에 앞서 내부 RCD 콘크리트가 타설된다. 상기와 같은 타설 방법의 변화에 의해서 다음과 같은 효과가 기대된다.
1) 내부의 RCD 콘크리트와 외부 콘크리트를 각각 독립에 타설 할 수 있어 공사의 효율이 향상한다.
2) 내부 콘크리트와 삽입된 거푸집이 완전하게 밀착되어 외부 콘크리트를 충분히 다짐을 할 수 있다.

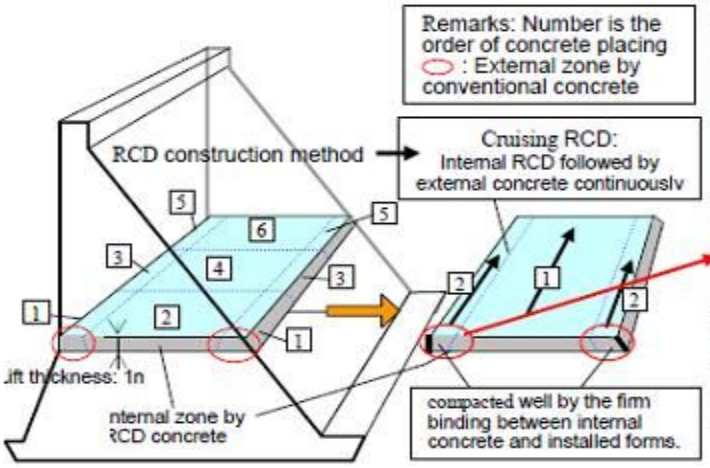

Figure 10- Concept of the rationalization by Cruising RCD

Photo 27- Compaction works at the end of internal concrete for cruising RCD, Kasegawa dam, 6.2008

7.2 프리캐스트 콘크리트 거푸집에 의한 간소화

일본에서는 콘크리트 공사의 안전성과 효율화 때문에 프리캐스트 콘크리트가 발달하고 있다. 지금까지 부재의 경량화, 강도의 확보, 각 세그먼트(segment) 접합부의 수밀성 향상 주변

콘크리트와의 부착 및 프리캐스트 콘크리트 타설에 관한 개량이 이루어지고 있다. 최근에는 상하류측 외부 프리캐스트 거푸집이 개발되어 콘크리트 공사의 간소화에 유리하다는 것이 확인되고 있다. 그림11 및 사진28는 타이호 댐 사례를 나타내고 있다.

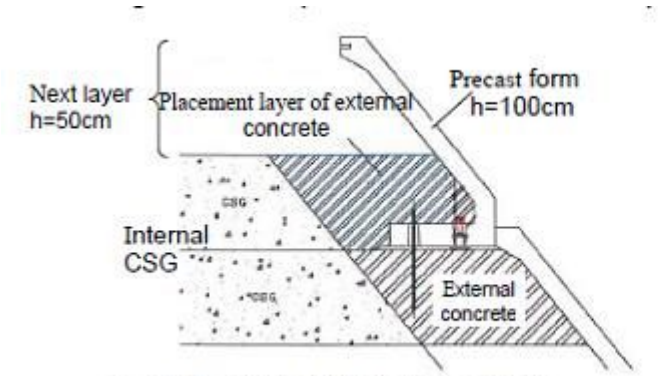

Figure 11- Cross section of precast form

Photo 28- Set up of precast form

7.3 IT기술을 이용한 시공 관리

근래에는 GPS 정보를 사용한 품질관리를 위한 IT기술, 최신의 계측 기기, 설계·시공에 관한 통합 정보가 급속히 진화하고 있다. 현재 가세카와 댐에서는 콘크리트의 수량 조사, 내부 콘크리트의 온도 감시, 3차원 drawing, 노무비 절감, 계측 등의 정성 및 정량 관리에 실시간 IT시 스템이 적용되고 있다. 사진29는 IT기술에 의한 장비의 GPS 위치확인과 다짐횟수 확인을 통한 RCD다짐 공사 관리를 나타낸 것이다.

Photo 29- Vibratory roller SD451 with IT, Kasegawa dam

현재 일본에서는 효율화와 품질 향상을 목표로 하고 IT기술을 이용한 콘크리트 댐의 시공 관리를 다른 RCD 댐에도 적용할 예정이다.

8.사례

RCD 공법은 많은 RCD 댐 건설에 있어서 건설부(현 국토교통성) 수자원공단(현 수자원 기구) 그 외 단체에 의해 개발되었습니다.

또한 국내의 연구 조직(대학, 협회, 기술 센터)과 민간기업(건설업체와 컨설턴트)은 RCD 기술의 향상에 크게 기여했습니다.

그 결과 일본에 있어서의 롤러전압 콘크리트 댐의 주요한 실적은 세계 RCC 기술 개선에 크게 공헌했습니다. 저자 등은 콘크리트 댐의 기술 지원으로서 RCD 공법에 관한 관계 부처의 기술 위원회 댐 기술 센터의 활동에 참가해 RCD 기술의 개발에 종사하고 있습니다. 우리는 귀중한 데이터와 자료를 제공 받은 RCD 공법에 관계하는 모든 단체에 감사에 말씀 드립니다.