

계곡형상을 고려한 CFRD의 축조 중 침하량 예측

Settlement Estimation of CFRD Considering Valley Shape During Construction Period

박한규¹⁾, Han-Gyu Park, 김용성²⁾, Yong-Seong Kim, 임희대³⁾, Heui-Dae Lim

1) 한국수자원공사 수자원연구원 댐안전연구소 소장, Manager, Korea Water Resources Corporation

2) 한국수자원공사 수자원연구원 선임연구원, Senior Researcher, Korea Water Resources Corporation

3) 충남대학교 공과대학 토목공학과 교수, Professor, Dept. of Civil Engineering, Chungnam University

SYNOPSIS : In this study, settlement characteristics of 38 CFRD was investigated from monitoring data and the method to estimate the dam settlements considering valley shape during constructions was proposed. The construction modulus of dam was found to be dependent on void ratios and valley shape factor. The construction modulus varied with valley shape and decreased with increasing void ratio. Also, the modulus was increased when the shape coefficient was less than 4. The settlement investigation results showed that the total settlement was proportional to the value of the settlement coefficient multiplied by the shape coefficient divided by void ratio.

Keywords : CFRD, settlement, shape factor, shape coefficient, valley width ratio

1. 서 론

콘크리트 표면차수벽형 석피댐(Concrete Faced Rockfill Dam, 이하 CFRD라 약칭함)은 흙댐에 비하여 경제적이고 성능면에서도 탁월하여 지난 110여 년간 세계 도처에서 많이 건설되어져 왔다. 1895년 미국 캘리포니아에서 최초의 CFRD인 Morena댐 건설이래 Strawberry(USA, 1916), Dix River(USA, 1925), Salt Springs(USA, 1931), Cogswell(USA, 1934)댐 등 초창기에는 주로 미국에서 많이 건설되었고, 이후 페루(Malpas, 1936), 칠레(Cogoti, 1939), 포르투갈(Salazar, 1949), 일본(Ishibuchi, 1953), 멕시코(Pinzanes, 1956) 등에서도 CFRD가 속속 건설되었다. 이 시기의 댐 축조방식은 투석공법 형식의 비다짐 축조방식(Dumped Rockfill)으로서 CFRD는 ECRD(Earth Cored Rockfill Dam, 이하 ECRD라 약칭함)와 함께 댐 축조 형식의 주류를 이루게 된다. 한편, CFRD는 댐 높이 75m까지는 어느 정도 만족스러웠으나 그보다 높은 댐에 있어서는 비다짐 락필의 높은 압축성 때문에 표면부에 균열이 발생하고 Face slab의 균질하지 못한 지지 등으로 상당한 누수현상을 보여 일부에서는 CFRD 보다 ECRD를 선호하기도 하였다.

진동롤러는 초창기에 도로 건설현장에서 제한적으로 이용되었으나 1960년대에 들어서면서부터 락필댐의 다짐에 대한 표준적인 건설장비로 발전하게 되며, 진동롤러의 도입으로 CFRD는 새롭게 부흥기를 맞게 되었다. 호주에서 1973년 완공한 110m 높이의 Cethana 댐은 쇄석에 콘크리트 차수벽을 갖는 다짐식 CFRD로서 슬립폼을 사용하는 기술로 차수벽의 수평이음을 제거하는 혁신적 방법을 도입하였으며, 향후 CFRD가 전 세계적으로 널리 퍼질 수 있게 만든 계기가 되었다.

최근 CFRD에 관한 연구도 CFRD의 건설 숫자와 비례하여 증가하였으며, Fitzpatrick 등(1985)은 CFRD에 있어 락필재료의 변형특성을 쉽게 표현할 수 있는 변형계수 구하는 간편한 방법을 제안하였고, Liu 등(1993)은 댐 건설 완료시점에서 축조재료에 기초한 CFRD의 락필 변형 특성을 연직변형을 및 압축계수로서 담수후 CFRD 침하분포 추정식을 제안하였다. Giudici 등(2000)은 호주에서 설계, 시공된 13

개의 CFRD에 대한 변형 특성을 고찰하고 시공중과 시공후의 CFRD의 변형계수 산정 시 특별히 체체의 강성에 대한 계곡형상의 영향에 대하여 보고하였으며, Hunter and Fell(2003)은 CFRD의 실제 사례를 바탕으로 합리적인 락필 거동 특성을 설명하였다. 그러나 CFRD의 거동이 계곡형상의 영향을 받고 있음을 인식하고 있음에도 불구하고 아직까지 댐 설계기준이나 댐 시공 관리지침 등에는 계곡형상을 고려한 침하량 산정방법이 제시되지 못하고 있는 실정이다.

본 연구에서는 국내·외 38개 CFRD 계측자료에 의한 댐체가 받는 하중의 변화에 따른 침하 변형 특성을 고찰하였으며, 계곡형상을 고려한 CFRD의 축조 중 침하량 산정 기법을 제안하였으며 향후 국내 CFRD의 설계·시공 및 장기적인 유지관리에 필요한 기초 자료를 제시하고자 하였다.

2. 계곡형상계수

계곡형상계수(Valley shape factor)는 콘크리트 페이스 면적(A , m^2)을 댐 높이의 자승으로 나눈 값을 말하며, 계곡이 좁을수록 낮고 넓을수록 높은 값을 보인다(Pinto & Marques Filho, 1998). 유사 개념의 계곡형상비(Valley width ratio)는 댐 길이를 댐 높이로 나눈 값으로 계곡형상을 고려한 댐체 거동 분석에 사용되어 왔다(Giudici et al., 2000).

표 1. CFRD 현황

No.	Dam	Country	Year	Height (m)	Length (m)	Face Area (10^3m^2)	Shape Factor (A/H^2)	Valley width Ratio	Shape Coefficient	Slopes	Rock Type
1	Cethana	Australia	1971	110	215	30	2.5	2.0	2.2	1.3, 1.3	Quartzite
2	Alto Anchicaya	Colombia	1974	140	260	22.3	1.1	1.9	1.5	1.4, 1.4	Hornfels
3	Little Para	Australia	1977	54	-	10	3.4		3.4	1.3, 1.4	Shale
4	Sugaroaf	Australia	1979	85	1050	83	11.5	12.4	11.9	1.5 2.2	Siltstone
5	Foz do Areia	Brazil	1980	160	828	139	5.4	5.2	5.3	1.4, 1.4	Basalt
6	Mackintosh	Australia	1981	75	465	27.5	4.9	6.2	5.5	1.3, 1.3	Greywacke
7	Mangrove creek	Australia	1981	80	384	29	4.5	4.8	4.7	1.5, 1.6	Siltstone
8	Tullabardine	Australia	1982	26	200	5.5	8.1	7.7	7.9	1.3, 1.3	Greywacke
9	Murchison	Australia	1982	94	200	17	1.9	2.1	2.0	1.3, 1.3	Rhyolite
10	Fortuna 1st	Panama	1982	60	1056	22	6.1	17.6	11.9	1.3, 1.4	Andesite
11	Bastyan	Australia	1983	75	430	19	3.4	5.7	4.6	1.3, 1.3	Rhyolite
12	Khao Laem	Thailand	1984	113	910	140	11	8.1	9.5	1.4, 1.4	Limestone
13	Shiroro	Nigeria	1984	125	560	65	4.2	4.5	4.3	1.3, 1.3	Granite
14	Kotmale	Sri Langka	1984	90	620	60	7.4	6.9	7.1	1.4, 1.45	Gneiss
15	Dongbok	Korea	1985	44.7	188.1	7	3.5	4.2	3.9	1.5, 1.5	Andesite
16	Lower Pieman	Australia	1986	122	360	37.8	2.5	3.0	2.7	1.3, 1.3~1.5	Dolerite
17	Pyonghwa(1st)	Korea	1988	80	410	45.7	7.1	5.1	6.1	1.5, 1.5	Gneiss
18	Guanmenshan	China	1988	58.5	183.6	8.2	2.4	3.1	2.8	1.4, 1.59	Andesite
19	Chengbing	China	1989	74.6	325	15.8	2.8	4.4	3.6	1.3, 1.3	Tuff
20	White Spur	Australia	1989	43	146	4.3	2.3	3.4	2.9	1.3, 1.3	Tuff
21	Xibeikou	China	1989	95	222	29.3	3.3	2.3	2.8	1.4, 1.4	Limestone
22	Longxi	China	1990	58.9	140.5	7.07	2.0	2.4	2.2	1.3, 1.3	Tuff
23	Zhushuqiao	China	1990	78	245	23	3.8	3.1	3.5	1.4, 1.7	Limestone
24	Huashan	China	1993	80.8	160.4	13.03	2.0	2.0	2.0	1.4, 1.4	Granite
25	Segredo	Brazil	1993	145	705	86	4.1	4.9	4.5	1.3, 1.2~1.4	Basalt
26	Xingo	Brazil	1994	150	850	135	6.0	5.7	5.8	1.4, 1.3	Granite
27	Wananxi	China	1995	93.8	210	18	2.0	2.2	2.1	1.4, 1.4	Granite
28	Buan	Korea	1996	50	282	18.2	7.3	5.6	6.5	1.4, 1.4	Rhyolite
29	Tianshenqiao	China	2000	178	1168	156	4.9	6.6	5.7	1.4, 1.25	Limestone
30	Yongdam	Korea	2001	70	498	43	8.8	7.1	7.9	1.4, 1.4	Schist
31	Miryang	Korea	2001	89	535	54	6.8	6.0	6.4	1.4, 1.4	Granite
32	Namgang	Korea	2001	34	1126	41.8	36.2	33.1	34.6	1.5, 1.5	Gneiss
33	Machadinho	Brazil	2002	125	700	77.3	5.0	5.6	5.3	1.3, 1.2	Basalt
34	Sancheong(L)	Korea	2002	70.9	286.1	31.7	6.3	4.0	5.2	1.4, 1.4	Granite
35	Sancheong(U)	Korea	2002	86.9	360	23	3.1	4.1	3.6	1.4, 1.4	Gneiss
36	Tamjin	Korea	2005	53	403	30	10.7	7.6	9.1	1.4, 1.8	Tuff
37	Yangyang	Korea	2005	72	347	26	5.0	4.8	4.9	1.4, 1.4	Gneiss
38	Daegok	Korea	2005	52	190	10	3.7	3.7	3.7	1.4, 1.8	Gneiss

그러나 계곡형상계수와 계곡형상비는 표 1에서 볼 수 있듯이 Fortuna 1st, Khao Laem, Namgang, Tamjin댐의 경우처럼 댐 길이가 긴 경우 다소 차이를 나타낸다. 또한 두 계수 중 어떤 계수가 좀 더 정확한 계곡형상을 나타내는지에 대한 정의를 내릴 수 없으므로 본 연구에서는 두 계수의 평균값(shape coefficient)을 사용하는 것으로 하였다.

3. CFRD의 축조 중 침하량 산정식

CFRD의 최종침하량 예측식과 관련하여 댐 설계기준(2003)에 별도로 규정된 것은 없다. 다만, 필댐의 최종침하량의 경우에는 댐 높이의 1% 내외로 하면 충분하고 다음의 (1)식과 같이 나타낼 수 있다.

$$S = 0.001H^{3/2} \quad (1)$$

여기서, S: 총침하량(m), H: 댐 높이(m)

그러나 필댐과 CFRD는 재료의 구성에 있어 많은 차이가 있으므로 침하양상 및 침하량도 다르므로 동일한 예측식을 사용할 수 없다. 댐 설계기준(2003)에서 CFRD의 여유고에 대해서는 댐 높이의 통상 0.1%~0.35% 정도로 추정하도록 되어 있다.

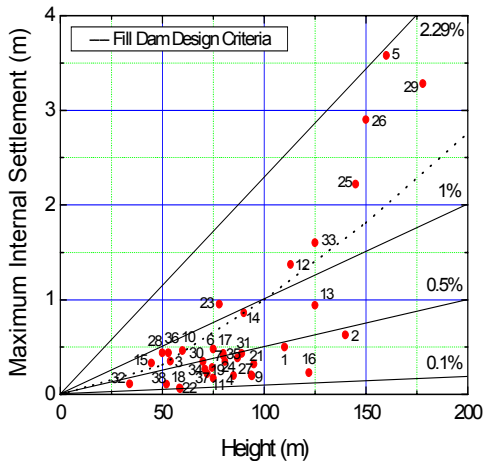


그림 1. 38개 CFRD의 댐 높이와 침하량 관계

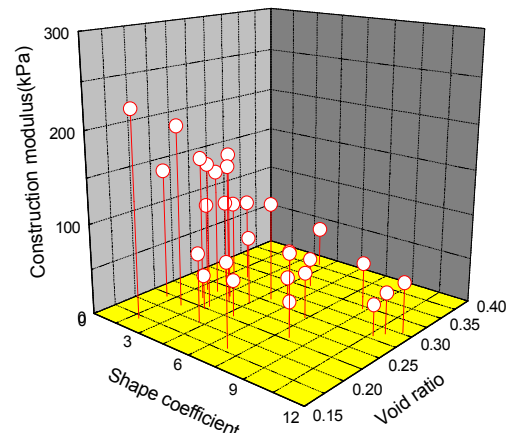


그림 2. 38개 CFRD의 변형계수, 형상계수, 간극비 관계

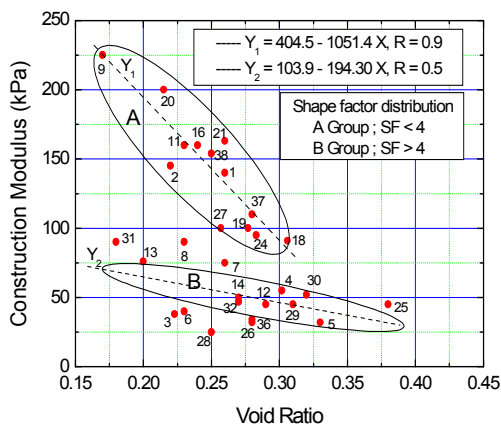


그림 3. 38개 CFRD의 변형계수와 간극비 관계

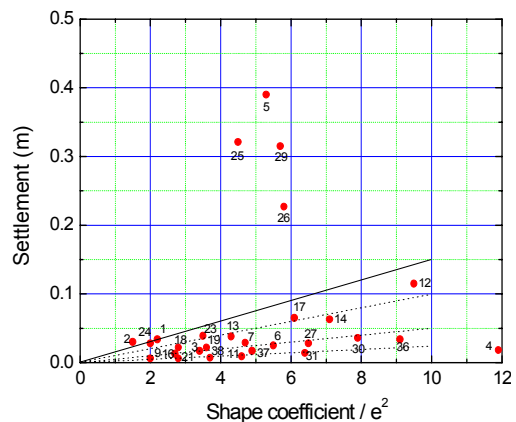


그림 4. 계곡형상을 고려한 침하량 특성

그림 1은 38개 CFRD의 댐 높이와 침하량 관계를 나타내며, 댐 높이가 100m이하일 경우 댐 높이의 1%이하의 침하량을 보이나 100m이상일 경우에는 2.29%정도의 침하량을 보이는 경우도 있다. 그러나 이들 댐은 Segredo(0.38), Foz do Areia(0.33), Tianshenquio(0.31), Khao Laem(0.29), Xingo(0.28) 등 대부분 제체의 간극비가 높은 경우이다. 그림 2와 그림 3에서 볼 수 있듯이 제체의 변형계수는 간극비와 계곡형상계수에 의존한다. 계곡형상에 따라 댐체의 변형계수는 달라지고, 변형계수가 높을수록 간극비는 낮아지며, 변형계수가 낮을수록 간극비는 높아진다. 또한 계곡형상이 4이하일 경우 변형계수가 높아지는 특성을 보인다. 따라서 계곡형상은 CFRD의 강도와 변형특성에 미치는 영향이 지대하며 또한 간극비는 침하양상을 분석하는데 매우 유용한 인자임을 알 수 있다.

한편, 그림 4에서 계곡형상계수(shape coefficient)를 간극비의 자승으로 나누어 침하량과 함께 도시해 보면 일정한 관계를 나타냄을 볼 수 있다. 그림 4로부터 계곡형상을 고려한 CFRD의 최종침하량 예측식은 다음의 (2)식과 같이 나타낼 수 있다.

$$S = \alpha (A + WH)/(e^2 H^2) \quad (1)$$

여기서, S: 총침하량(m), H: 댐 높이(m), W: 댐 길이(m), A: Face Slab 면적(m²), e: 제체의 간극비
 α : 침하량 계수(계곡형상계수가 4이하일 경우 0.01, 계곡형상계수가 4이상일 경우 0.006)

4. 결론

본 연구에서는 국내·외 38개 CFRD 계측자료에 의한 댐체가 받는 하중의 변화에 따른 침하 변형 특성을 고찰하였으며, 계곡형상을 고려한 CFRD의 축조 중 침하량 산정 기법을 제안하였으며 주요한 결론은 다음과 같다.

1. 제체의 변형계수는 간극비와 계곡형상계수에 의존하고 있으며, 계곡형상이 4이하일 경우 변형계수가 높아지는 특성을 보였다.
2. 계곡형상에 따라 댐체의 변형계수는 달라지고, 변형계수가 높을수록 간극비는 낮아지며, 변형계수가 낮을수록 간극비는 높아졌다.
3. 계곡형상을 고려한 CFRD의 침하량 분석 결과, 총침하량은 계곡형상계수(shape coefficient)를 간극비의 자승으로 나눈 값에 침하량 계수(0.006~0.01)를 곱한 것과 비례하는 것으로 나타났다.

References

1. 한국수자원학회(2003), **댐설계기준**, pp.169-277.
2. Fitzpatrick, M. D., Cole, B. A., Kinstler, F. L. and Knoop, B. P. (1985), "Design of Concrete-Faced Rockfill Dams", *Concrete Face Rockfill Dams-Design, Construction, and Performance*, Cooke, J. B and Sherard J. L., ed., pp.410-434.
3. Giudici, S., Herweynen, R. and Quinlan, P. (2000), "HEC Experience in Concrete Face Rockfill Dams - Past, Present and Future, *Proc. of International Symposium on Concrete Faced Rockfill Dams*, Beijing, pp.29-46.
4. Hunter, G. and Fell, R. (2003), "Rockfill Modulus and Settlement of Concrete Face Rockfill Dams", *Journal of Geotechnical and Geoenvironmental Engineering*, Vol.129, No.10, pp.909-917.
5. International Water Power & Dam Construction (2004), "*Year Book 2004*", pp.282-288.
6. Korea National Committee on Large Dams (2004), *Korea and Dams*, Hydropower and Dams, pp.86-189.
7. Korea Water Resources Corporation (2005), Dam Integration Information System.
8. Pinto, N. L. S. and Marques Filho, P. (1998), "Estimating the Maximum Face Deflection in CFRDs, *The International Journal on Hydropower & Dams*, Vol.5, Issue 6, pp.28-31.