

# 시공 중 및 담수 후 계측데이터를 이용한 CFRD의 침하량 예측 연구

## A Study on Settlement Prediction of Concrete-faced Rockfill Dam Using Measured Data During Construction and After Impounding

이 충 원<sup>1)</sup> · 김 용 성<sup>†</sup>

Chungwon Lee · Yongseong Kim

Received: October 4<sup>th</sup>, 2014; Revised: October 20<sup>th</sup>, 2014; Accepted: November 21<sup>st</sup>, 2014

**ABSTRACT** : In the present study, the prediction methods of the crest settlement after impounding and the maximum internal settlement during dam construction were proposed through the analysis on settlement data at 38 monitored points of 36 Concrete-Faced Rockfill Dams (CFRDs). The results from this analysis provided that the crest settlement and the maximum internal settlement are increased in proportion to the dam height and the void ratio. However, the relationship between internal settlement and dam height for each void-ratio range plotted in semi-logarithmic scale is the nearly same. Also, the prediction of the crest settlement of the CFRD is possible through the maximum internal settlement during dam construction. In addition, it seems that the valley shape highly affects the dense dam body with high construction modulus. The results of this study will provide the useful tool for the design, construction and management of CFRDs.

**Keywords** : Concrete-faced rockfill dam, Crest settlement, Internal settlement, Measured data, Empirical formula, Dam height

**요 지** : 본 연구에서는 36개의 CFRD에 대한 계측자료(38개 지점)를 통해 댐 축조단계에서 얻어지는 계측자료를 이용하여 담수 후 댐의 정부침하량 및 내부침하량 예측기법을 제안하였다. 전체 데이터에 대한 분석 결과, 댐체의 정부침하량 및 시공 중 최대 내부침하량은 댐체의 높이 및 간극비에 비례하였다. 그러나 내부침하량과 댐 높이에 대한 반대수지 상에서의 선형회귀분석 결과는 간극비에 따른 차이 없이 대단히 유사함을 확인하였다. 또한 CFRD의 시공 중 내부침하량을 통해 정부침하량의 예측이 가능하였으며, 댐체가 조밀할 경우 연직변형계수가 크게 평가됨과 동시에 계곡형상의 영향을 많이 받는 것으로 나타났다. 본 연구결과는 향후 CFRD의 설계, 시공, 장기적 유지관리를 위한 유용한 도구가 될 것으로 사료된다.

**주요어** : 콘크리트 표면 차수벽형 석괴댐, 정부침하량, 내부침하량, 계측 자료, 경험식, 댐 높이

## 1. 서 론

1990년대 이후, 우리나라에서 축조되었거나 축조 중인 댐의 대부분은 콘크리트 표면 차수벽형 석괴댐(CFRD, Concrete-Faced Rockfill Dam)으로 시공되고 있다. 그러나 이러한 CFRD의 양적 증가에도 불구하고 CFRD에 대한 설계, 시공 및 유지관리는 경험에 의존하는 경우가 많으며, CFRD의 거동특성에 대한 연구도 미미한 실정이다. 또한 CFRD의 건설 후 침하량 산정에 있어서는 별도의 설계기준이 마련되어 있지 않아, 설계 단계에서 CFRD의 건설 후 침하량 추정 시 중심 코어형 록필댐(Center-Cored Rockfill Dam, CCRD)을 기본으로 한 필댐의 설계기준을 이용하고 있다. 댐 설계기준에서는 필댐의 설계단계에서의 장기침하량은 재료의 압축성과 축조 시 다짐의 불균등에서 오는 간극 등을 고려하여 축

조 완료 후로부터 0.10%H~0.35%H(H: 댐 높이)를 제시하고 있다(Ministry of Land, Transport and Maritime Affairs of Korea, 2011). 이러한 필댐 설계기준은 CFRD와 CCRD의 축조재료별 강도-변형 특성에 따른 침하량의 차이로 인하여 여성고 추정 시 과다 및 과소설계가 될 수 있으므로 정확한 여성고 산정을 위해 CFRD의 건설 후 침하량 산정 방법의 개발이 요구되고 있다.

CFRD의 침하거동 연구에 있어 Soydemir & Kjaernsli (1979)는 초기 담수 시와 10년 동안 운영 시의 정상부 최대 침하량 예측기법을 제안하였으며, Clements(1984)는 최량적 합기법에 의해 Soydemir와 Kjaernsli의 예측기법을 수정 및 보완하였고, Liu et al.(1993)은 댐 건설 완료시점에서 축조재료에 기초한 CFRD의 록필 변형특성을 연직변형률 및 압축계수로서 담수 후 CFRD 침하분포 추정식을 제안하였다. 그

1) Institute for Advanced Construction Materials, Kangwon National University

† Department of Regional Infrastructure Engineering, Kangwon National University (Corresponding Author : yskim2@kangwon.ac.kr)

리나 Soydemir & Kjaernsli(1979) 및 Clements(1984)의 예측기법은 연구대상이 총 9개의 다짐 차수벽형 록필댐(Membrane-faced compacted rockfill dam) 중에서 아스팔트 차수벽형 록필댐이 6개, CFRD가 3개로 아스팔트 차수벽형 록필댐에 대한 연구결과를 더 많이 포함하고 있으며, 상관계수도 초기 담수 시 0.274, 10년 운영 시 0.437로서 매우 낮아 CFRD 분석자료로서 이용하기에는 적용성에 한계를 지닌다. 또한 Liu et al.(1993)의 예측식은 대형압축시험을 통한 수직압축 계수의 산정이 별도로 필요하여 활용성이 낮으며, 예측식의 검증이 1개의 댐 이외에 확인되지 않아 별도의 검증절차가 요구된다.

본 연구에서는 36개의 CFRD에 대한 계측자료(38개 지점)를 통해 댐 축조단계에서 얻어지는 계측자료를 이용하여

담수 후 댐의 정부침하량 및 내부침하량 예측기법을 제안하였으며, 이를 통해 향후 국내 CFRD의 설계, 시공, 장기적 유지관리를 위한 기초자료를 제공하고자 하였다. 본 연구를 통해 얻어진 결과물은 여성고 결정 등 댐의 설계·시공 및 계측관리의 신뢰도 증진 등 댐 유지관리 측면에서 댐 기술자에게 유용한 도구로서 활용 가능할 것으로 전망된다.

## 2. 계측자료 분석에 의한 CFRD의 침하량 예측

### 2.1 분석자료

Table 1은 9개국의 CFRD 중에서 축조 중의 내부침하량

Table 1. Summary of CFRD data used in this study

No.	Name	Country	Year completed	Height H (m)	Ratio (L/H)	Shape Factor (A/H <sup>2</sup> )	Void Ratio	End of construction		After impounding	
								Internal settlement (%H)	E <sub>v</sub> (MPa)	Crest settlement (%H)	Time (year)
1	Cethana	Australia	1971	110.00	1.95	2.50	0.26	0.455	140	0.16	30
2	Alto Anchicaya	Colombia	1974	140.00	1.86	1.10	0.22	0.45	145	0.124	10
3	Golillas	Colombia	1978	127.00	0.87	0.90	0.24	0.307	155	0.045	7
4	Sugarloaf	Australia	1979	85.00	12.35	11.50	0.302	0.235	55	0.244	16.2
5	Foz do Areia	Brazil	1980	160.00	5.18	5.40	0.33	2.238	47	0.131	20
6	Mackintosh	Australia	1981	75.00	6.20	4.90	0.24	0.64	45	0.313	19
7	Mangrove creek	Australia	1981	80.00	4.80	4.50	0.26	0.538	75	0.105	4
8	Tullabardine	Australia	1982	26.00	7.69	8.10	0.23	0.808	90	0.076	12.8
9	Murchison	Australia	1982	94.00	2.13	1.90	0.234	0.207	190	0.087	18
10	Bastyan	Australia	1983	75.00	5.73	3.40	0.23	0.227	160	0.071	9
11	Salvajina	Colombia	1983	154.00	2.77	2.40	0.21	0.195	205	0.061	7.5
12	KhaoLaem	Thailand	1984	113.00	8.05	11.00	0.29	1.212	59	0.165	14
13	Shiroro	Nigeria	1984	125.00	4.48	4.20	0.2	0.752	76	0.133	1.8
14	Kotmale	Sri Langka	1984	90.00	6.89	7.40	0.27	0.956	50	0.167	
15	Dongbok	Korea	1985	44.70	4.21	3.50	0.27	0.736	26	0.096	7
16	Lower Pieman	Australia	1986	122.00	2.95	2.50	0.24	0.189	160	0.181	15
17	Pyonghwa (1st)	Korea	2006	125.00	4.81	5.44	0.2	0.394	45.8	0.122	7
18	Chengbing	China	1989	74.60	4.36	2.80	0.277	0.378	100	0.13	10
19	White Spur	Australia	1989	43.00	3.40	2.30	0.215	0.151	180	0.135	5.9
20	Xibeikou	China	1989	95.00	2.34	3.30	0.284	0.337	80	0.064	6
21	Crotty	Australia	1990	83.00	2.89	1.90	0.2	0.216	375	0.067	9
22	Segredo	Brazil	1993	145.00	4.86	4.10	0.37	1.531	45	0.158	8
23	Aguamilpa	Mexico	1993	187.00	2.94	3.90	0.18	1.754	190	0.182	7
24	Xingo	Brazil	1994	150.00	5.67	6.00	0.28	1.933	34	0.621	6
25	Wananxi	China	1995	93.80	2.24	2.00	0.257	0.22	100	0.358	
26	Buan	Korea	1996	50.00	5.64	7.30	0.25	0.88	25	0.408	18
27	Tianshenqiao	China	2000	178.00	6.56	4.90	0.31	1.843	45	0.596	1.5
28	Ita	Brazil	2000	125.00	7.04	7.00	0.308	0.394	48	0.48	3
29	Yongdam	Korea	2001	70.00	7.11	8.80	0.32	0.496	52	0.176	13
30	Miryang	Korea	2001	89.00	6.01	6.80	0.18	0.483	90	0.099	13
31	Namgang	Korea	2001	34.00	33.12	36.20	0.27	0.618	47	0.038	13
32	Sancheong (L)	Korea	2002	70.90	4.04	6.30	0.27	0.375	83	0.349	4
33	Sancheong (U)	Korea	2002	86.90	4.14	3.10	0.27	0.444	92	0.349	4
34	Jangheung	Korea	2005	53.00	7.60	10.70	0.28	0.798	34	0.028	8
35	Daegok	Korea	2005	52.00	3.65	3.70	0.25	0.206	154	0.037	9
36	Gunwi	Korea	2009	45.00	8.70	7.60	0.26	0.438	48	0.022	3
37	Yecheonyangsu (L)	Korea	2011	63.00	8.50	10.10	0.22	0.001	60	0.014	1
38	Yecheonyangsu (U)	Korea	2011	73.00	8.50	10.10	0.22	0.134	60	0.000	1

및 담수 후의 정부침하량 예측자료가 확보된 36개 CFRD (38개 지점)에 대한 예측자료의 현황을 나타낸다. 본 Table 은 Park et al.(2005), Seo et al.(2009) 및 Kim et al.(2014)의 데이터를 보완한 것으로 CFRD의 이름, 소재국가, 축조년 도, 높이, 댐 형상비(L/H), 계곡형상계수(A/H<sup>2</sup>), 간극비, 시 공완료 시의 상대 내부침하량 및 연직변형계수(E<sub>v</sub>), 담수 후 의 상대 정부침하량 및 경과시간을 표기하고 있다. 여기서 내부침하량(Internal settlement, S<sub>i</sub>)은 댐 축조 중 제체 내부 에서 발생한 침하량의 최대치를 의미하며, 정부침하량(Crest settlement, S)은 담수 후에 제체 정상부에서 발생한 침하량 의 최대치를 의미한다. 본 Table에서도 두 침하량은 댐의 높 이(H)로 나누어진 상대침하량의 개념으로 기술되었다.

## 2.2 CFRD의 침하량 예측

CFRD의 정확한 침하량 예측에는 많은 어려움이 있으며, 그 원인은 댐체의 침하에 직·간접적으로 영향을 미치는 다 양한 영향인자들에 기인한다. Hunter & Fell(2003)은 댐의 높이(H), 정상부의 길이(L), 형상비(L/H), 상류사면 경사 등 으로 표현되는 댐체의 형상과 압질, 일축압축강도, 입경, 균 등계수 입도분포, 건조밀도, 간극비, 다짐층 두께, 롤러 중 량, 다짐장비 통과횟수, 살수량 등으로 표현되는 록필 재료 의 물성 및 축조방법이 댐체의 침하량에 대한 영향인자임을 보고하였다.

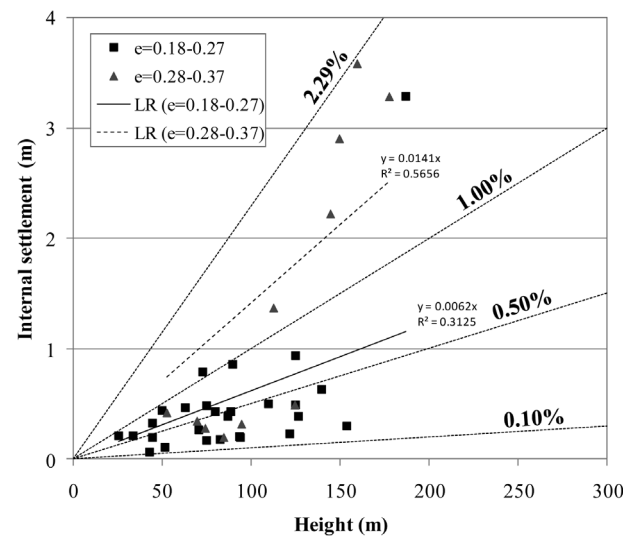
CFRD의 침하량 예측을 위하여 다수의 연구자가 연구를 수행하여 왔다. Clements(1984)는 68개의 록필 댐에 대한 자료를 바탕으로 준공 후 정부 침하량 예측에 사용되는 경 험식의 유용성 여부에 대해 검토하였다. 검토 결과 기존의 경험식은 단순하게 변위와 높이 또는 시간에 근거하므로 많 은 오류의 가능성이 있어 합리적인 변형 예측은 곤란하며, 이에 대한 대안으로 유사 특성을 갖는 기존의 댐에 대한 침 하곡선을 이용할 것을 제안하였다. 이와 함께 롤러로 다짐 시공된 CFRD의 준공 후 정부침하량은 댐 높이의 0~0.25% 임을 보고하였다. Sherard & Cooke(1987)은 1985년 미국 뉴 욕에서 개최된 CFRD의 설계와 시공 및 수행에 관한 심포 지엄에 발표된 논문들을 분석하였으며, 이로부터 준공 후 3 ~30년이 경과하게 되면 롤러에 의한 다짐시공에 비해 투석 공법으로 시공된 CFRD에서 약 3~8배 정도 큰 정부침하가 발생하며, 현대식 다짐장비로 높이가 100m인 CFRD를 시공 할 경우 준공 5년 후의 정부침하량은 10~15cm, 100년 후에는 15~25cm가 발생할 것으로 예측하였다. 이는 Clements(1984) 가 보고한 CFRD에서의 준공 후 정부침하량 범위와 일치한 다(Kim et al., 2009).

### 2.2.1 간극비에 따른 침하량 분석

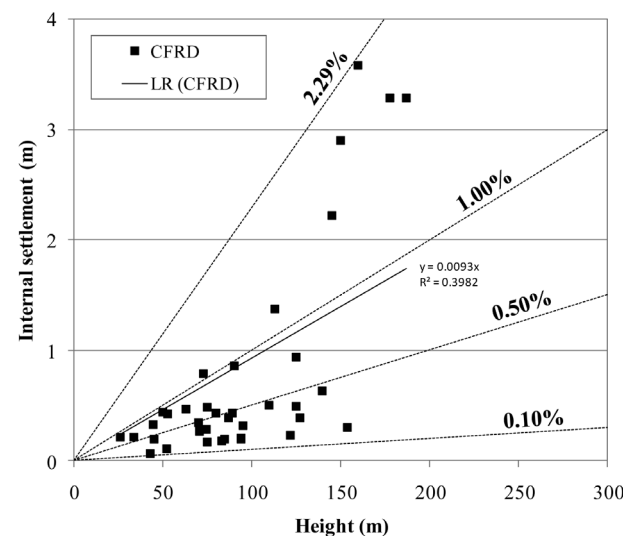
Fig. 1(a)는 36개 CFRD(38개 지점)에 대한 예측자료에 대해 댐체의 간극비를 0.18~0.27, 0.28~0.37의 2가지 유형 으로 구분하여 댐 높이와 내부침하량의 관계를 도시한 뒤 선형회귀분석 결과를 나타내었으며, Fig. 1(b)는 전체 데이 터에 대한 선형회귀분석 결과를 나타내었다. Fig. 1(a)로부 터 댐체의 간극비가 0.18~0.27 및 0.28~0.37일 때의 회귀 식, 상관계수(R) 및 결정계수(R<sup>2</sup>)는 각각 다음과 같다.

$$y_1 = 0.0062x \quad (R=0.5590, R^2=0.3125) \quad (1)$$

$$y_2 = 0.0141x \quad (R=0.7521, R^2=0.5656) \quad (2)$$



(a) Relationship between dam height and internal settlement for each void-ratio range



(b) Relationship between dam height and internal settlement for entire data

Fig. 1. Relationship between dam height and internal settlement on void ratio

여기서  $y_1$  및  $y_2$ 는 각각 댐체의 간극비가 0.18~0.27 및 0.28~0.37일 때의 시공 중 최대 내부침하량(m),  $x$ 는 댐의 높이(m)이다. 본 결과로부터 최대 내부침하량은 댐의 높이에 따라 증가하며, 댐체의 간극비가 클수록 내부침하량이 크게 발생함을 알 수 있다. 또한 내부침하량은 150m보다 낮은 댐에 대해서는 0.1%H~1.0%H의 범위로 나타났으며, 간극비가 0.28 이상이며 다른 CFRD에 비해 상대적으로 규모가 큰 5개의 댐(Segredo, Foz do Areia, Tianshenquio, Khao Laem, Xingo)에 대해서는 1.0%H~2.29%H로 나타나고 있다. 이와 함께 Fig. 1(b)로부터 전체 데이터에 대한 회귀식, 상관계수(R) 및 결정계수( $R^2$ )는 다음과 같이 나타난다.

$$y=0.0093x \quad (R=0.6310, R^2=0.3982) \quad (3)$$

여기서  $y$ 는 CFRD의 내부침하량(m),  $x$ 는 댐의 높이(m)이다. 본 그래프로부터 시공 중 최대 내부침하량은 평균적으로 0.93%H(H: 댐 높이)로 평가되었다.

Fig. 2(a)는 전체 계측자료를 2가지 간극비의 유형(0.18~0.27, 0.28~0.37)으로 구분하여 내부침하량과 댐 높이의 관계를 반대수지 상에 도시하고 선형회귀분석을 수행한 것이며, Fig. 2(b)는 전체 데이터에 대하여 선형회귀분석을 수행한 결과이다. Fig. 2(a)로부터 댐체의 간극비가 0.18~0.27 및 0.28~0.37일 때의 회귀식, 상관계수(R) 및 결정계수( $R^2$ )는 각각 다음과 같이 나타난다.

$$y_1=30.768\ln(x)+119.87 \quad (R=0.6056, R^2=0.3668) \quad (4)$$

$$y_2=32.751\ln(x)+119.47 \quad (R=0.8843, R^2=0.7820) \quad (5)$$

여기서  $y_1$  및  $y_2$ 는 각각 댐체의 간극비가 0.18~0.27 및 0.28~0.37일 때의 댐의 높이,  $x$ 는 시공 중 최대 내부침하량(m)이다. 본 결과로부터 반대수지 상에서 내부침하량과 댐 높이의 관계는 간극비에 따른 차이 없이 대단히 유사함을 확인할 수 있다. Fig. 2(b)로부터 전체 데이터에 대한 회귀식, 상관계수(R) 및 결정계수( $R^2$ )는 다음과 같이 나타난다.

$$y=31.341\ln(x)+120.11 \quad (R=0.7312, R^2=0.5346) \quad (6)$$

여기서  $y$ 는 CFRD의 높이(m),  $x$ 는 시공 중 최대 내부침하량(m)이다. 따라서 본 식을 이용할 경우 CFRD의 최종 높이에 대한 시공 중 최대 내부침하량의 예측이 가능할 것으로 사료된다.

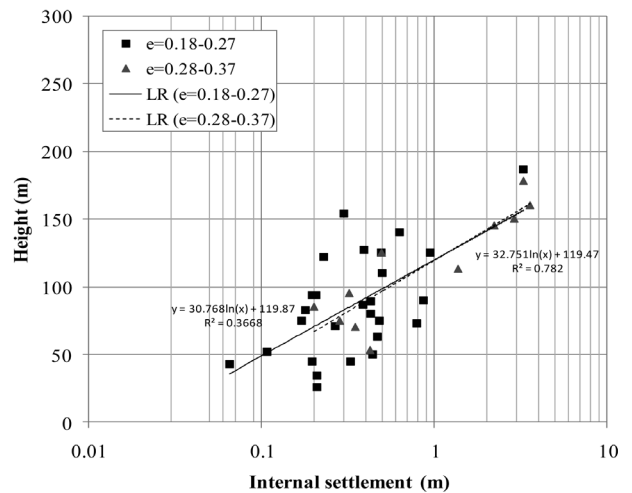
Fig. 3(a)는 36개 CFRD(38개 지점)에 대한 계측자료에 대해 댐체의 간극비를 0.18~0.27, 0.28~0.37의 2가지 유형

으로 구분하여 댐 높이와 정부침하량의 관계를 도시한 뒤 선형회귀분석한 결과를 나타내었으며, Fig. 3(b)는 전체 데이터에 대한 선형회귀분석 결과를 나타내었다. Fig. 3(a)로부터 댐체의 간극비가 0.18~0.27 및 0.28~0.37일 때의 회귀식, 상관계수(R) 및 결정계수( $R^2$ )는 각각 다음과 같다.

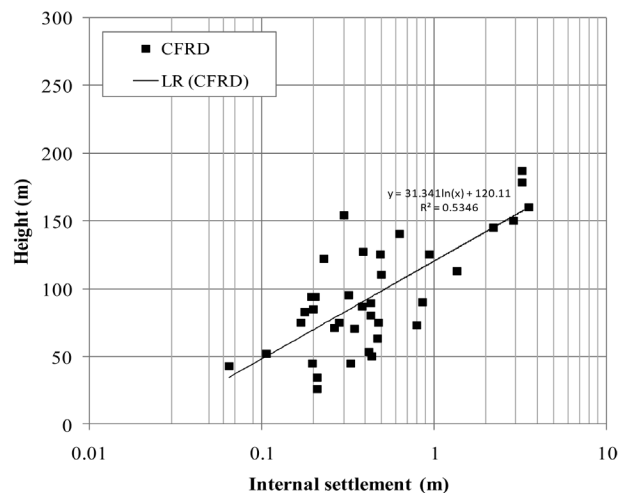
$$y_1=0.0014x \quad (R=0.5128, R^2=0.2630) \quad (7)$$

$$y_2=0.0033x \quad (R=0.6339, R^2=0.4018) \quad (8)$$

여기서  $y_1$  및  $y_2$ 는 각각 댐체의 간극비가 0.18~0.27 및 0.28~0.37일 때의 정부침하량(m),  $x$ 는 댐의 높이(m)이다. 본 결과로부터 정부침하량은 댐의 높이에 따라 증가하며, 댐체의 간극비가 클수록 정부침하량이 크게 발생함을 알 수



(a) Relationship between internal settlement and dam height for each void-ratio range



(b) Relationship between internal settlement and dam height for entire data

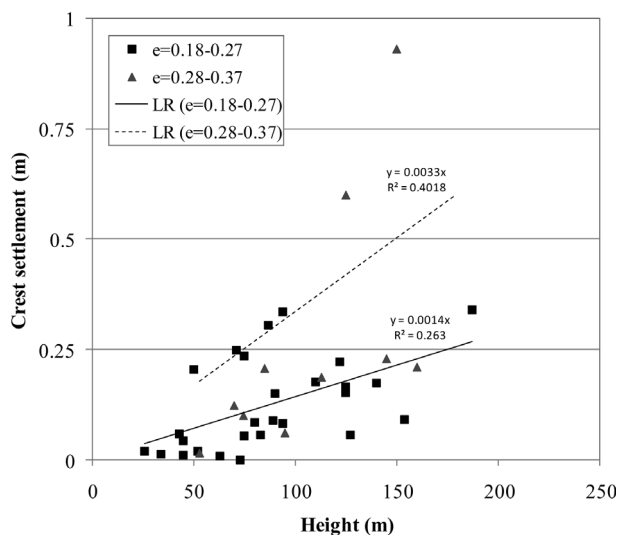
Fig. 2. Relationship between dam height and internal settlement on void ratio plotted in semi-logarithmic scale

있다. 또한 Fig. 3(b)로부터 전체 데이터에 대한 회귀식, 상관계수(R) 및 결정계수(R<sup>2</sup>)는 다음과 같이 나타난다.

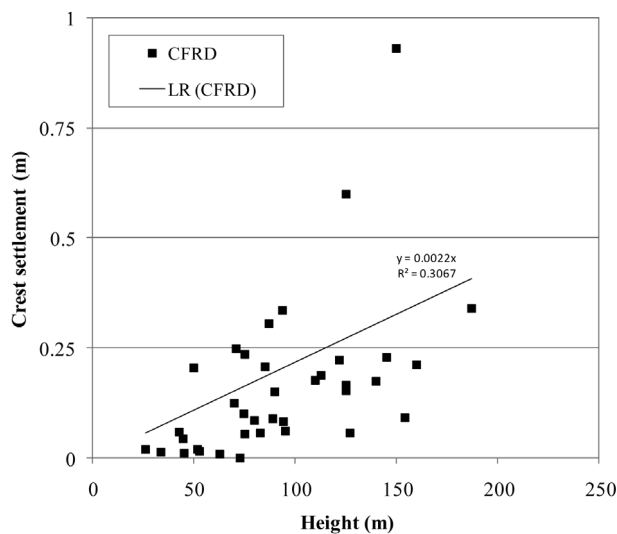
$$y=0.0022x \quad (R=0.5538, R^2=0.3067) \quad (9)$$

여기서 y는 CFRD의 정부침하량(m), x는 댐의 높이이다. 본 결과로부터 CFRD의 정부침하량은 0.22%H(H: 댐 높이)로 나타난다. Kim et al.(2006)은 CFRD의 정부침하량 발생 범위를 0.05%H~0.96%H로 보고하였으며, 본 연구결과는 이 범위 내에 포함되어 CFRD의 댐 높이와 정부침하량의 관계를 양호하게 표현하는 것으로 판단된다.

CFRD에서 침하관리를 위한 계측은 설계 시 조건의 확



(a) Relationship between dam height and crest settlement for each void-ratio range



(b) Relationship between dam height and crest settlement for entire data

Fig. 3. Relationship between dam height and crest settlement on void ratio

인, 댐 축조 후 안전관리 및 유지관리 등을 목적으로 시행한다. 댐의 정부침하는 성토 완료 및 담수 이후부터 발생하므로 댐 유지관리의 정밀도를 제고하기 위하여 시공 중 침하량을 고려함이 중요하다고 판단된다.

Fig. 4는 CFRD의 전체 계측자료에 대하여 댐체의 간극비를 0.18~0.27, 0.28~0.37의 2가지 유형으로 구분하여 내부침하량과 정부침하량의 관계를 반대수지 상에 도시한 뒤 선형회귀분석한 결과를 나타내었다. 회귀식, 상관계수(R) 및 결정계수(R<sup>2</sup>)는 각각 다음과 같다.

$$y_1=0.0570\ln(x)+0.1857 \quad (R=0.4199, R^2=0.1763) \quad (10)$$

$$y_2=0.1888\ln(x)+0.3728 \quad (R=0.5844, R^2=0.3415) \quad (11)$$

여기서 y<sub>1</sub> 및 y<sub>2</sub>는 각각 댐체의 간극비가 0.18~0.27, 0.28~0.37일 때의 정부침하량(m), x는 시공 중 최대 내부침하량(m)이다. 본 결과로부터 간극비가 클 경우 내부침하량이 동일하더라도 정부침하량이 상대적으로 크게 평가되는 경향을 확인할 수 있다.

Fig. 5는 전체 데이터에 대하여 내부침하량을 나타내는 x축을 산술축으로 환원하여 선형회귀분석을 수행한 결과를 나타내었다. 회귀식, 상관계수(R) 및 결정계수(R<sup>2</sup>)는 다음과 같이 나타난다.

$$y=0.1896x \quad (R=0.5843, R^2=0.3414) \quad (12)$$

여기서 y는 CFRD의 정부침하량(m), x는 시공 중 최대 내부침하량(m)이며, 본 결과로부터 CFRD의 정부침하량은

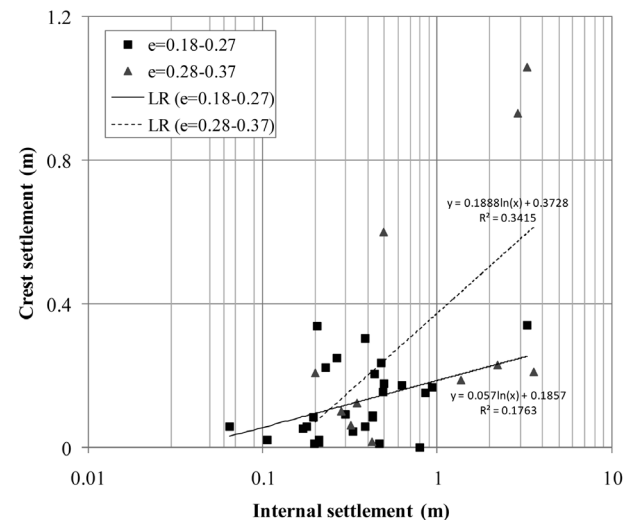


Fig. 4. Relationship between internal settlement and crest settlement on void ratio in semi-logarithmic scale

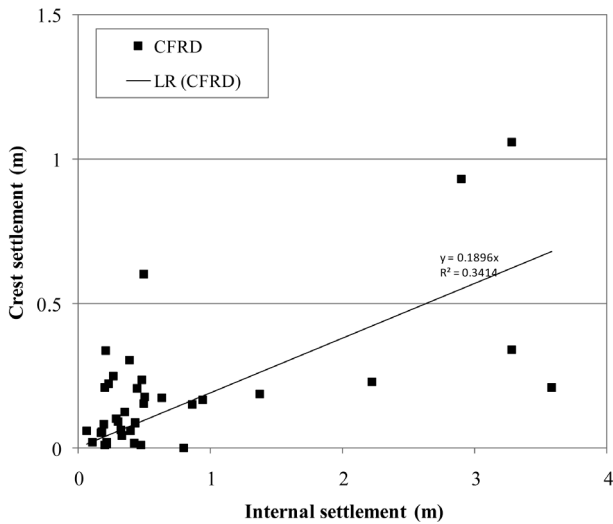


Fig. 5. Relationship between internal settlement and crest settlement

내부침하량의 0.190배로 평가되었다. 이는 Kim et al.(2012)이 제시한 0.213배, Kim et al.(2010)이 제시한 0.247배와 유사한 결과이며, CFRD의 정부침하량은 시공 중 내부침하량의 0.1~0.5배임을 보고한 Park et al.(2005)의 연구결과에도 부합된다.

### 2.2.2 연직변형계수에 따른 침하량 분석

CFRD의 변형계수(Construction modulus)는 록필의 간극비 및 모암의 재료에 따라 변화한다. 변형계수는 시공 중의 연직침하량과 침하계상의 연직하중으로부터 다음과 같이 유도된다(Pinto & Marques, 1998).

$$E_v = \frac{H\gamma_r h}{1000s} \quad (13)$$

여기서  $E_v$ 는 연직변형계수(Construction modulus, MPa),  $H$ 는 록필의 침하계까지의 깊이(m),  $\gamma_r$ 는 록필의 단위중량( $\text{kN/m}^3$ ),  $h$ 는 침하계 아래로의 록필의 깊이(m),  $s$ 는 침하계에 의해 계측된 침하량(m)이다.

이론적으로 연직변형계수( $E_v$ )는 댐 높이의 증가에 따라 감소한다. 그러나 실제적으로 모든 경우에 대하여 이와 같은 현상이 공통적으로 발생하지는 않는다. 초기에 채석된 록필 재료는 이후에 채석된 것에 비해 품질이 낮은 경향이 있다. 이러한 이유로 인해 상대적으로 저품질의 록필 재료가 댐의 하부에 위치할 가능성이 있다(Fitzpatrick et al., 1973; Fitzpatrick et al., 1985). 그러나 록필 재료의 변형 특성에는 많은 변수가 관계되며, 암석의 강도도 중요하지만 강도가 약하더라도 사면의 경사 완화 및 철저한 다짐시공 등에 의해 변형량을 줄일 수 있으므로 암석강도 자체가 지배적인

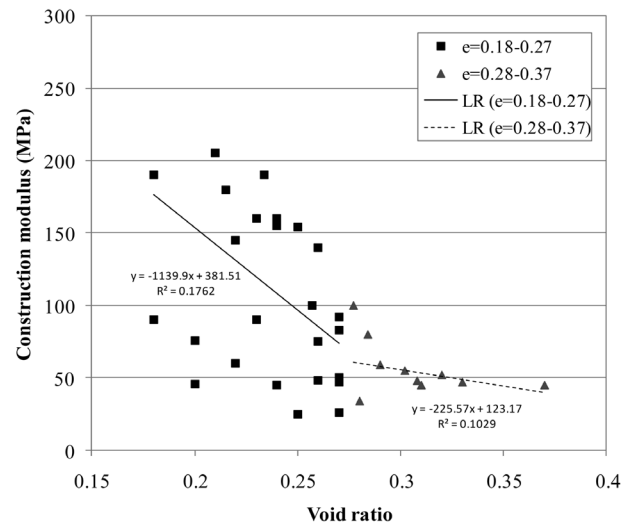


Fig. 6. Relationship between void ratio and construction modulus

요소가 되지는 않는다. Pinto & Marques(1998)는 다짐도의 측정을 위한 댐체의 간극비 적용방법을 제안하였다.

계곡부의 형태는 양안부 사면에 나타나는 아칭현상 때문에 CFRD 내의 연직응력에 상당한 영향을 미친다(Pinto & Marques, 1998; Giudici et al., 2000). 계곡부 아칭현상(Cross-valley arching)은 댐체 하부의 1/3~1/2의 범위에 걸쳐 가파른 양안부 사면경사( $50^\circ$  이상)를 가진 좁은 협곡(하폭이 댐 높이의 30%~40% 이하인 경우)일수록 두드러지게 나타나며, 이때 연직응력은 20% 이상 감소한다(Hunter & Fell, 2003). 계곡형상계수(Valley shape factor)는 콘크리트 페이스 면적(Concrete face area,  $A$ ; unit:  $\text{m}^2$ )을 댐 높이(Height,  $H$ ; unit: m)의 제곱으로 나눈 값( $A/H^2$ )을 말하며, 계곡이 좁을수록 작고 넓을수록 커진다(Pinto & Marques, 1998). Park et al.(2005)은 좁은 계곡에서는 계곡형상계수가 4보다 작으며, 연직변형계수가 증가함을 보고하였다.

따라서 본 연구에서는 간극비-연직변형계수의 관계 및 계곡형상계수-연직변형계수의 관계를 이용하여 간극비 및 계곡형상계수에 의한 상대 내부침하량 및 상대 정부침하량의 예측 가능성을 검토하였다. Fig. 6은 CFRD의 전체 계측 자료에 대하여 댐체의 간극비를 0.18~0.27, 0.28~0.37의 2가지 유형으로 구분하여 간극비와 연직변형계수의 관계를 도시한 뒤 선형회귀분석한 결과를 나타내었다. 각각의 회귀식, 상관계수( $R$ ) 및 결정계수( $R^2$ )는 각각 다음과 같은 식들로 나타난다.

$$y_1 = -1139.9x + 381.51 \quad (R=0.4198, R^2=0.1762) \quad (14)$$

$$y_2 = -225.57x + 123.17 \quad (R=0.3208, R^2=0.1029) \quad (15)$$

여기서  $y_1$  및  $y_2$ 는 각각 댐체의 간극비가 0.18~0.27, 0.28~0.37일 때의 연직변형계수(MPa),  $x$ 는 간극비이다. 본 결과로부터 연직변형계수는 간극비가 0.28 미만인 경우 간극비 증가에 따라 급격히 감소하는 경향을 나타내며, 간극비가 0.28 이상인 경우에는 간극비 증가에 따라 상대적으로 완만하게 감소함을 알 수 있다.

Fig. 7에 CFRD의 전체 계측자료에 대하여 계곡형상계수를 4 미만 및 4 이상의 2가지 유형으로 구분하여 각각 간극비와 연직변형계수의 관계를 도시한 뒤 선형회귀분석한 결과를 나타내었다. 이에 대한 회귀식, 상관계수(R) 및 결정계수( $R^2$ )는 다음과 같은 식들로 나타난다.

$$y_1 = -1933.2x + 616.86 \quad (R=0.7535, R^2=0.5678) \quad (16)$$

$$y_2 = -166.28x + 99.464 \quad (R=0.4424, R^2=0.1957) \quad (17)$$

여기서  $y_1$  및  $y_2$ 는 각각 계곡형상계수가 4 미만 및 4 이상일 때의 연직변형계수(MPa),  $x$ 는 간극비이다. Fig. 7로부터 회귀직선은 계곡형상계수가 4 미만인 좁은 계곡에 건설된 댐들에 대해서는 급격한 기울기를 나타내고 있으나, 계곡형상계수가 4 이상인 넓은 계곡에 건설된 댐들에 대해서는 상대적으로 완만한 기울기를 보이고 있다. 즉 본 데이터들은 다소의 분산은 있으나 계곡형상계수가 댐의 침하량 분석에 유용하게 사용될 수 있음을 보여주고 있다.

Fig. 8에 CFRD의 전체 계측자료에 대하여 댐체의 간극비를 0.18~0.27, 0.28~0.37의 2가지 유형으로 구분하여 계곡형상계수와 연직변형계수의 관계를 반대수지상에 도시한 뒤 선형회귀분석한 결과를 나타내었다. 이에 대한 회귀식, 상관

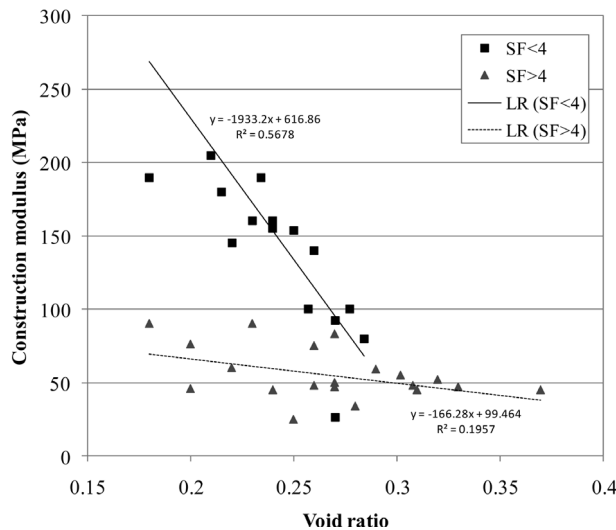


Fig. 7. Relationship between void ratio and construction modulus for each shape-factor range

계수(R) 및 결정계수( $R^2$ )는 다음과 같은 식들로 나타난다.

$$y_1 = -59.70 \ln(x) + 197.80 \quad (R=0.6037, R^2=0.3644) \quad (18)$$

$$y_2 = -22.44 \ln(x) + 95.323 \quad (R=0.5616, R^2=0.3154) \quad (19)$$

여기서  $y_1$  및  $y_2$ 는 댐체의 간극비가 각각 0.18~0.27, 0.28~0.37일 때의 연직변형계수(MPa),  $x$ 는 계곡형상계수이다. 본 관계로부터 연직변형계수가 계곡형상계수의 증가에 따라 감소함을 알 수 있으며, 특히 간극비가 상대적으로 작을 경우 계곡형상계수의 증가에 따른 연직변형계수의 급격한 감소가 확인된다. 이로부터 록필의 간극비는 변형량에 직접적인 관계가 있으며, 댐체가 조밀할 경우 변형계수가 크게 평가됨과 동시에 계곡형상의 영향을 많이 받는 것으로 사료된다. 즉 계곡형상은 댐의 양단부 사이의 아칭(Arching)에 의한 응력의 재배치에 의해 다져진 록필의 연직변형계수에 상당한 영향을 미칠 가능성이 있다.

Fig. 9 및 Fig. 10은 CFRD의 전체 계측자료에 대하여 댐체의 간극비를 0.18~0.27, 0.28~0.37의 2가지 유형으로 구분하여 각각 상대 내부침하량-연직변형계수 및 상대 정부침하량-연직변형계수의 관계를 도시한 뒤 선형회귀분석한 결과를 나타내었다. Fig. 9로부터 상대 내부침하량-연직변형계수에 대한 회귀식, 상관계수(R) 및 결정계수( $R^2$ )는 다음과 같은 식들로 나타난다.

$$y_1 = -46.154x + 135.42 \quad (R=0.2168, R^2=0.0470) \quad (20)$$

$$y_2 = -13.955x + 68.911 \quad (R=0.5263, R^2=0.2770) \quad (21)$$

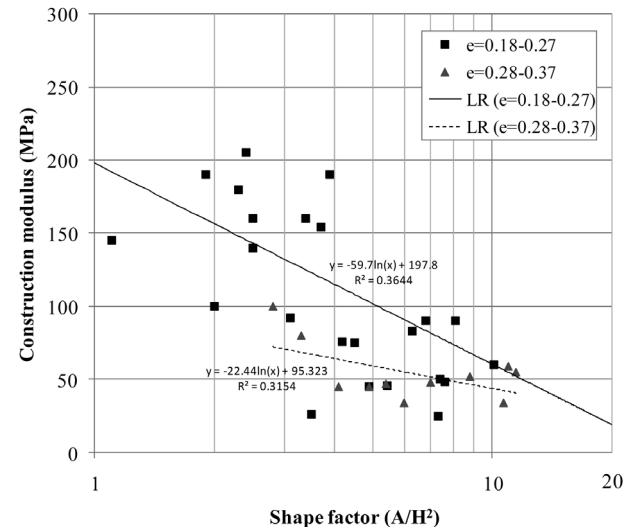


Fig. 8. Relationship between shape factor and construction modulus for each void-ratio range

여기서  $y_1$  및  $y_2$ 는 각각 댐체의 간극비가 0.18~0.27, 0.28~0.37일 때의 연직변형계수(MPa),  $x$ 는 상대 내부침하량(m)이다. 또한 Fig. 10으로부터 상대 정부침하량-연직변형계수에 대한 회귀식, 상관계수(R) 및 결정계수( $R^2$ )는 다음과 같다.

$$y_1 = -143.62x + 133.8 \quad (R=0.2184, R^2=0.0477) \quad (22)$$

$$y_2 = -37.121x + 63.88 \quad (R=0.3976, R^2=0.1581) \quad (23)$$

여기서  $y_1$  및  $y_2$ 는 각각 댐체의 간극비가 0.18~0.27, 0.28~0.37일 때의 연직변형계수(MPa),  $x$ 는 상대 정부침하량(m)이다. 이들로부터 연직변형계수의 감소에 의해 간극비가 0.28 미만인 경우에는 상대 내부침하량 및 정부침하량이 급

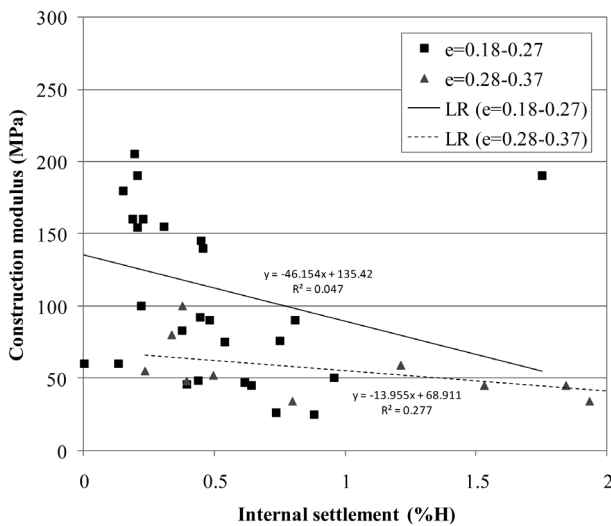


Fig. 9. Relationship between relative internal settlement and construction modulus for each void-ratio range

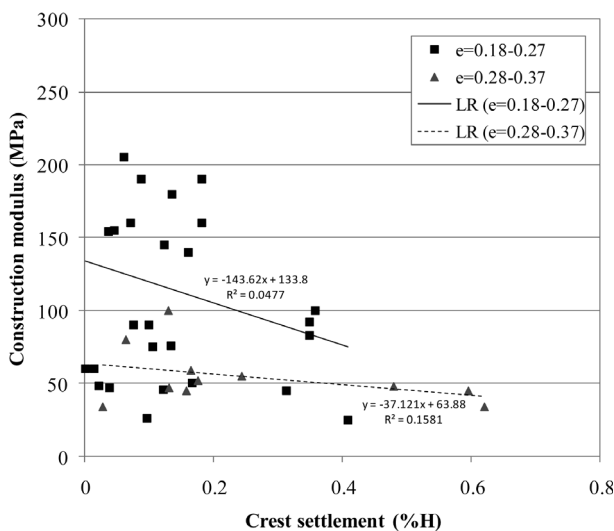


Fig. 10. Relationship between relative crest settlement and construction modulus for each void-ratio range

격히 증가하나, 간극비가 0.28 이상인 경우에는 상대 내부침하량 및 정부침하량이 완만하게 증가하는 결과를 나타낸다. 이는 CFRD의 간극비가 0.28보다 큰 경우, 간극비 증가에 따른 연직변형계수의 감소가 상대적으로 완만하다는 Fig. 6에서의 해석결과와 상통한다.

Fig. 9 및 Fig. 10을 통해 연직변형계수를 이용한 상대 내부침하량 및 상대 정부침하량 예측이 가능함을 나타내었으나, 계측 데이터에는 상당한 분산이 확인되고 있다. Fig. 11에 CFRD의 담수 후 경과시간과 상대 정부침하량의 관계를 도시하였다. 본 결과로부터 일부 댐에서는 계측 시간이 다른 댐보다 짧음에도 불구하고 정부침하량이 오히려 많은 경우도 나타나고 있다. 이러한 양상은 CFRD의 담수 후 거동이 제체의 축조 규모, 록필 재료의 물성 및 축조방법 등 여러 인자의 영향을 받기 때문이다.

Hunter & Fell(2003)은 초기 담수에 의한 정부침하량에 대하여 매우 높은 강도를 갖는 다짐식 록필은 0.02H%~0.05H%, 중간 및 높은 강도의 다짐식 록필은 0.1H%~0.15H%임을 보고하였다. 본 연구에서 사용된 CFRD의 전체 계측자료로부터 정부침하량은 평균 0.17H%(A선)로 나타나고 있으며, 대부분 댐 설계기준의 장기침하량 예측기준인 0.10H%~0.35H%의 상한치인 0.35H%(B선) 이내임을 알 수 있다. 다만, Buan(0.408H%) 댐, Ita(0.480H%) 댐, Tianshenqiao(0.596H%) 댐, Xingo(0.621H%) 댐은 정부침하량이 0.35H%을 초과하고 있으며, 이는 각각 축조재료의 낮은 강도(Xingo,  $E_v=34$ MPa; Buan,  $E_v=25$ MPa; Ita,  $E_v=48$ MPa) 및 다른 댐에 비해 훨씬 더 높은 댐의 형상(Tianshenqiao, H=178m)에 기인한다. 따라서 CFRD 설계 시 정부침하량 추정에 있어 댐 설계기준 및 각종 경험식들의 일반적인 적용보다는 설계대상 댐 축조재

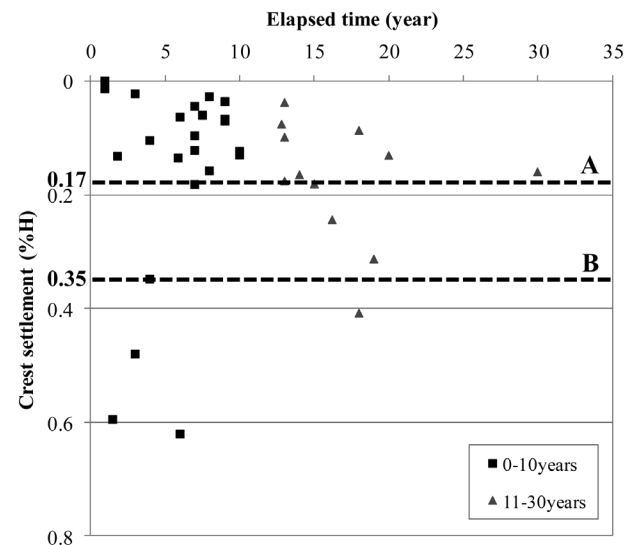


Fig. 11. Relationship between elapsed time after CFRD construction and relative crest settlement



료의 특성 및 제체의 형상을 고려한 적용이 바람직할 것으로 판단된다.

### 3. 결 론

본 연구에서는 36개의 CFRD에 대한 계측자료(38개 지점)를 통해 댐 축조단계에서 얻어지는 계측자료를 이용하여 담수 후 댐의 정부침하량 및 내부침하량 예측기법을 제안하였으며, 이를 통해 향후 국내 CFRD의 설계, 시공, 장기적 유지관리를 위한 기초자료를 제공하고자 하였다. 본 연구로부터 얻은 결론은 다음과 같다.

- (1) 댐체의 시공 중 최대 내부침하량은 댐의 높이에 따라 증가하며, 댐체의 간극비가 클수록 내부침하량이 크게 발생함을 알 수 있었다. 그러나 내부침하량과 댐 높이에 대한 반대수지 상에서의 선형회귀분석 결과는 간극비에 따른 차이 없이 대단히 유사하였으므로 본 회귀식을 이용하여 CFRD의 최종 높이에 대한 시공 중 최대 내부침하량의 예측이 가능할 것으로 사료된다.
- (2) 정부침하량은 댐의 높이에 따라 증가하며 댐체의 간극비가 클수록 정부침하량이 크게 발생함을 알 수 있었다. 또한 간극비가 클 경우 내부침하량이 동일하더라도 정부침하량이 상대적으로 크게 평가되는 경향을 확인할 수 있었으며, CFRD의 정부침하량은 내부침하량의 0.190 배로 평가되어 기존 연구결과와 유사하였다.
- (3) 연직변형계수는 계곡형상계수의 증가에 따라 감소하며, 특히 간극비가 상대적으로 작을 경우 급격히 감소하였다. 이로부터 록필의 간극비는 변형량에 직접적인 관계가 있으며, 댐체가 조밀할 경우 변형계수가 크게 평가됨과 동시에 계곡형상의 영향을 많이 받는 것으로 사료된다. 즉 계곡형상은 댐의 양단부 사이의 아칭(Arching)에 의한 응력의 재배치에 의해 록필의 연직변형계수에 상당한 영향을 미칠 가능성이 있다.
- (4) 본 연구에서는 연직변형계수를 이용한 상대 내부침하량 및 상대 정부침하량 예측이 가능함을 나타내었으나 계측 데이터에는 상당한 분산이 확인되고 있다. 따라서 CFRD 설계 시 정부침하량 추정에 있어 댐 설계기준 및 각종 경험식들의 일반적인 적용보다는 설계대상 댐 축조재료의 특성 및 제체의 형상을 고려한 적용이 바람직할 것으로 판단된다.

### References

1. Clements, R. P. (1984), Post-construction deformation of rockfill dams, *Journal of Geotechnical Engineering*, Vol. 110, No. 7, pp. 821~840.
2. Fitzpatrick, M. D., Cole, B. A., Kinster, F. L. and Knoop, B. P. (1985), Design on concrete-faced rockfill dams, *Concrete Raced Rockfill Dams-Design, Construction, and Performance*, Cooke, J. B. and Sherard, J. L., ed., pp. 410~434.
3. Fitzpatrick, M. D., Liggins, T. B., Lack, L. J. and Knoop, B. P. (1973), Instrumentation and performance of cethana dam, *Eleventh International Congress on Large Dams*, Madrid, Q. 42, R. 9, pp. 145~164.
4. 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.
5. 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.
6. Kim, B. T., Kim, Y. S. and Koo, J. H. (2010), Prediction of crest settlement of CFRD using an artificial neural network model, *KSCE Annual conference*, pp. 2184~2187 (in Korean).
7. Kim, Y. S., Choi, J. S., Won, M. S. and Lee, H. H. (2009), A study on the deformation behavior of post-construction crest settlement, Face Slab Deformation, and Leakage of Concrete Faced Rockfill Dams, *Journal of Korean Geosynthetics Society*, Vol. 8, No. 2, pp. 31~39 (in Korean).
8. Kim, Y. S., Kim, B. J. and Oh, S. E. (2012), Prediction of crest settlement of center cored rockfill dam using an artificial neural network model, *Journal of the Korean Society of Agricultural Engineers*, Vol. 54, No. 4, pp. 73~81 (in Korean).
9. Kim, Y. S., Kim, B. J., Shin, D. H. and Park, H. G. (2006), Settlement behavior prediction of CFRD after impounding, *Journal of the Korean Society of Civil Engineers*, Vol. 26, No. 3C, pp. 209~218 (in Korean).
10. Kim, Y. S., Seo, M. W., Lee, C. W. and Kang, G. C. (2014), Deformation characteristics during construction and after impoundment of the CFRD-type daegok dam, Korea, *Engineering Geology*, Vol. 178, pp. 1~14.
11. Liu, F. M., Chen, Y. B., Liu, J. and Ni, Y. L. (1993), Construction materials selection and characteristics of wan an xi concrete faced rockfill dam, *Proc. of International Symposium on High Earth-Rockfill Dams*, Beijing, Vol. 1, pp. 272~285.
12. Ministry of Land, Transport and Maritime Affairs of Korea (2011), *Dam design criteria commentary*, p. 108.
13. Park, H. G., Seo, M. W., Kim, Y. S. and Lim, H. D. (2005), Settlement behavior characteristics of CFRD in construction period; case of daegok dam, *Journal of the Korean Geotechnical Society*, Vol. 21, No. 7, pp. 91~105.
14. Pinto, N. L. S. and Marques, F. P. (1998), Estimating the maximum face deflection in CFRDs, *The international Journal on Hydropower & Dams*, Vol. 5, Issue 6, pp. 28~31.
15. Seo, M. W., Ha, I. S., Kim, Y. S. and Olson, S. M. (2009), Behavior of concrete-faced rockfill dams during initial impoundment, *J. Geotech. Geoenviron. Eng.*, Vol. 135, No. 8, pp. 1070~1081.
16. Sherard, J. L. and Cooke, J. B. (1987), Concrete-face rockfill dam: i, assessment. *Journal of Geotechnical Engineering*, Vol. 113, No. 10, pp. 1096~1112.
17. Soydemir, C. and Kjaernsli, B. (1979), Deformation of membrane-faced rockfill dams, *Seventh European Conference on Soil Mechanics and Foundation Engineering*, 3, pp. 281~284.

1. Clements, R. P. (1984), Post-construction deformation of rockfill