석괴댐의 축조 중 내부 침하 거동 평가

Evaluation of Internal Settlement of Rockfill Dam under Construction

서민우* · 김용성**†

Seo, Min Woo · Kim, Yong Seong

ABSTRACT

The purposes of this research are to analyze the internal settlement behavior of Concrete Faced Rockfill Dam (CFRD) typed 'D dam' and to evaluate the stability of the 'D dam' during dam construction using internal settlement measurements and results of numerical analysis. The field measurements were obtained during dam construction period. The numerical analysis was also carried out for the same construction period. The numerical analysis focused mainly on prediction of stress and displacement behavior of 'D dam' during dam construction stage using input parameters obtained from laboratory tests, i.e. large triaxial tests. The behavior of 'D dam' was evaluated to be stable from comparing the results of field measurements and numerical analysis. A simple empirical equation is also presented to predict final settlement at the completion of dam construction, using settlement measurement monitored during dam embankment.

Keywords: Rockfill dam; settlement; dam construction; numerical analysis; field measurement

1. 서 론

최근 정부에서는 4대강 살리기 사업의 일환으로서 기존 농업용 저수지 96개소의 제체를 승상하여 2.5억 m³의 저수량을 확보하기로 계획을 수립하였다. 저수지 증고 방법에 대해서는 기존 제체 및 여수로 조건 등을 고려하여 선정하기로 되어 있으나, 기존의 저수지 형식과 동일한 사력댐 또는 석괴댐 형식이 주류를 이룰 가능성이 매우 높다.

이러한 시대적 상황에 따라 댐의 증고에 따른 제체 거동 특성 분석에 관한 연구가 댐 설계자들의 주요한 관심 대상이 되고 있다. 기존의 저수지와 관련한 국내의 연구로 Chang et al. (1997)은 경기도 내 31개 저수지에 대해 현장조사 및 실내시험을 실시하여 농업용 저수지의 제체부, 구조물부에 대한 노후도를 평가하였으며, Min and Lee (2008)는 연약지반 상에 축조된 저수지의 성토하중과 수위변화를 고려한 과잉공극수압을 예측하기 위한 새로운 이론식을 유도하였다. Chang and Lee

(2004)는 콘크리트 표면차수벽형 흙댐 (Concrete faced earthfill dam, CFED) 시공 후 자중에 의한 응력 및 변형 특성뿐만 아니라, 물 하중에 의한 거동 특성을 수치해석을 통해 예측하고 실측치와 비교 분석하여 CFED의 적용성을 검증한 바 있다.

댐체의 거동 연구는 축조과정에서의 침하와 수평변위, 응력의 증가, 침투 거동, 축조 후 담수에 따른 변위 및 응력의 재배열, 지진시의 동적 응답거동, 시간경과에 따른 장기적 크리프 거동 연구 등으로 구분할 수 있다. 이 중에서도 주로 댐 건설 중의 제체의 침하 거동 특성 (Park et al., 2005), 초기 담수시의 제체 거동 특성 (Kim et al., 2006; Seo and Kim, 2007; Seo et al., 2008) 및 댐 건설 후 제체의 거동 특성 (Park et al., 1995; Kim et al., 2001; Shin, 2003; Im et al., 2005) 등과 관련한 연구가 댐 기술자들에게 주된 관심을 받고 있다.

외국의 석괴댐 관련 연구 동향을 살펴보면, 콘크리트 표면차수벽형 석괴댐 (Concrete faced rockfill dam, CFRD)과 중앙차수벽형 석괴댐 (Center cored rockfill dam, CCRD)으로 대별 되는데, 본 연구에서는 CFRD에 주안점을 두고자 한다. CFRD의 축조 중 및 담수 후 제체 침하 거동에 대한 대표적인 연구로서는 Khalid et al. (1990), Saboya and Byrne (1993), Justo and Durand (2000), Habibagahi (2002), Hunter and Fell (2003), Ozkuzukiran et al. (2006), Kim and Kim (2008), Seo et al. (2009) 등의 연구가 있다.

* (주)삼성물산 건설부문

** 강원대학교 지역건설공학과

† Corresponding author Tel.: +82-33-250-6463

Fax: +82-33-251-6463

E-mail: yskim2@kangwon.ac.kr

2010년 6월 14일 투고

2010년 6월 29일 심사완료

2010년 7월 5일 게재확정

댐은 건설시의 여러 가지 인위적인 요인과 환경적인 요인이 복합되어 매우 복잡한 거동양상을 보이기 때문에 모든 요인을 고려한 정확한 수치해석은 불가능하다. 그럼에도 불구하고 댐 설계자들은 2차원 평면 변형조건을 기초로 한 수치해석을 통해 댐체 내부 응력 분포 등 유용한 정보를 얻고 있으며, 아직 보편적으로 적용되고 있지는 않지만 간혹 3차원 해석을 통해 3차원 형상에 따른 댐체 내부의 복잡한 응력 분포 등 다양한 정보를 제공받고 있다.

건설 중 거동을 고려하는 방법에는 중력의존 방법 (Gravity Turn-on Method)과 증분 방법 (Incremental Method) 등의 두 가지 방법이 있다. 먼저, 중력의존 방법은 'Single Lift Method'로 불리며 댐 전체가 순간적으로 성토되는 것으로 보아 한 번에 댐 전체를 해석하는 방법이다. 이 해석은 통상 댐 마루에서 최대 침하, 댐 사면에서 최대 수평변위가 일어나는 것으로 계산된다. 중력의존 방법은 계산시간이 작게 걸려 간단하게 댐 거동을 고찰하는 데는 유용하나 정확성은 떨어진다. 반면 증분 방법은 중력의존 방법과 달리 건설 단계를 하중 증분형태로 고려하는 방법으로 보다 정확한 해석 방법으로 평가되며 현재는 거의 모든 댐 거동해석에서 이 방법을 사용하고 있다 (Kulhawy et al., 1969; Duncan, 1996).

댐 축조 중 침하량은 댐 건설 공사시 제체의 안전, 다짐도 결정, 여성과 결정 및 축조재료의 물량산출에 관련되는 중요한 인자이다. 일반적으로 석괴댐에서는 축조 중 침하 및 장기 침하를 고려하여 더쌓기를 실시하는데, 이 양은 재료의 압축성과 다짐의 불균등에서 오는 공극 등을 고려하여 제체 축조 완료 후로부터 댐 높이의 통상 0.1 % ~ 0.35 % 정도로 추정된다

(Korea Water Resources Association, 2005).

댐 건설 기간은 규모에 따라 다르지만 대략 1 ~ 4년 정도로서 장기간이고 최초 댐 설계시 적용되었던 설계정수들이 현장 시공과정상 차이점이 발견될 경우 수정이 필요한데 댐 축조 중 침하량과 관련된 설계정수도 그러하다. 그동안의 연구에서는 댐 축조 완료 단계에서 발생한 침하량을 통해 장기 침하량을 예측하는 연구가 대부분이었으나 (Park et al., 2005; Kim et al., 2006; Seo and Kim, 2007; Seo et al., 2008), 축조 단계에서 축조 완료 단계의 침하량을 예측하는 연구는 거의 찾아볼 수 없었다. 축조 단계별 침하량 분석을 통해 댐 축조 중간 단계에서 축조 완료 단계의 침하량을 예측할 수 있다면 다짐도, 여성과, 축조 물량 등의 재결정 등 댐 건설공사시 설계변경에 필요한 제반 정보를 제공하는데 기여할 수 있을 것이다.

본 연구에서는 증분방법을 이용한 축조 단계별 CFRD의 응력-변형 거동해석을 수행하여 안정성을 검토하고 계측자료 분석을 통하여 수치해석의 타당성을 검증하며, 댐 축조 단계에서 축조 완료 단계의 침하량을 예측하는 간편식을 제안함으로써 국내 CFRD의 설계·시공·관리에 도움이 될 수 있는 기초 자료를 제공하고자 한다.

II. 모델 댐의 일반 현황

모델댐은 울산광역시에 소재하고 있는 댐으로 높이 52.0 m, 길이 190.0 m의 CFRD 형식의 댐으로서 표면차수벽 아래 부분에는 2겹의 변화구간 (Bedding zone, Transition/Filter zone)을 두어 표면차수벽의 지지층 역할을 담당하게 하고, 예기치

Table 1 Instrumentations installed in model dam (D dam)

Instrumentation	Object	Unit	Elevation (m)	Position
Inclinometer for face slab deflection	Measuring the deflection of concrete face slab	1	EL. 78.0 ~ 126.8	Center of upstream slope
Differential settlement gauge	Measuring settlement of each layer vertically at center of dam Datum magnetic sensor: 1Ea Plater magnetic sensor: 10Ea	1	EL. 76.0 ~ 126.8	Center of the crest
Inclinometer	Measuring the horizontal deflection at the center of dam	1	EL. 76.0 ~ 126.8	Center of the crest
Settlement cell	Measuring differential settlement of inner position using difference of pressure	12	EL. 95.0 (7 units), 110.0 (5 units)	Upstream (5 units), downstream (7 units)

Fig. 1 Cross-section of model dam

못한 표면차수벽의 균열 손상에 의해 누수가 발생한 경우에도 침투수를 적절히 제어할 수 있도록 설계되었다.

차수벽 콘크리트는 최소 30 cm의 두께와 0.40 %의 철근비를 가지고 있으며, 댐 상류사면은 1:1.4의 경사를 유지하고, 하류면 경사는 1:1.8의 완만한 경사를 유지하고 있다. 본댐의 하류사면에는 EL. 102.0 m까지 친환경 성토층이 있으며, 댐 toe 부에는 누수집수벽이 설치되었다.

모델댐에는 시공과정, 담수시, 향후 댐운영시 댐체의 거동을 보다 정확하게 파악하여 안정성을 확보하기 위해 여러 종류의 계측기가 매설되었으며, 본 연구와 관련한 매설기기의 내역, 목적, 위치, 수량 등은 Table 1과 같다.

제체는 필트 및 록필재료를 포함하여 6가지 재료 (Face Slab, Zone 1; Face Bedding, Zone 2; Filter (Transition), Zone 3; Graded Rock-Fill, Zone 4; Rock-Fill, Zone 5; Planting Zone)로 축조되었으며, 각 존의 위치는 Fig. 1과 같다 (Zone 별 최대입경: Zone 1, 75 mm 이하; Zone 2, 150 mm 이하; Zone 3, 800 mm 이하; Zone 4, 600 mm 이하; Zone 5, 일반 토사).

III. 모델 댐의 수치해석

1. 개요

수치해석을 위해서는 축조재료의 응력-변형 특성을 합리적으로 수치화하는 것이 가장 중요한 과제이다. 그동안의 문헌조사를 통하여 각 모델이 댐의 거동해석에 적용된 예를 검토한 결과 Hyperbolic 모델 (Duncam and Chang, 1970)이 비교적 토질의 변화에 따른 파라미터 (parameter)의 결정이 용이하고 기존의 댐들에 대한 거동해석에 만족스런 결과를 보여주는 것으로 알려져 있다 (Kim et al., 1987).

본 해석에서는 Hyperbolic 모델을 사용하여 댐 축조재료의 응력-변형 거동을 모델링하였으며, 그동안 사력댐의 해석을 통하여 정확성이 어느 정도 검증된 범용 프로그램이 SIGMA/W

를 이용하여 축조 중의 댐의 거동을 분석하였다.

Table 2는 본 해석에 적용된 토질 강도정수를 나타낸다. 본 해석에 적용된 토질정수는 보다 실제와 가까운 입력변수를 도출하기 위하여 기존 댐에서 수행되었던 대형삼축시험 결과를 댐 축조시의 현장밀도에 맞게 조정하는 Linear fitting method를 적용하여 산정하였다.

2. 응력-변형 거동 분석

본 연구에서는 축조단계를 실제 현장과 동일하게 62단계로 나누어 성토하고 Face Slab 타설 1단계 및 Planting Zone 축조 5단계로 하여 총 68단계로 재하하는 것으로 모델링 하였다.

댐 중심축에 대한 건설기간동안의 층별침하량은 Fig. 2에서 보이는 바와 같이, 각 성토고에 따른 침하 양상이 일정하며, 최대 층별침하량은 댐 중앙보다 약간 상부측에서 발생하였다.

Fig. 2(a) ~ Fig. 2(c)에서 성토고에 따른 침하 양상은 댐 중앙측 보다는 상류사면 및 하류사면의 양 중앙측에서 최대치를 보이고 있으며, 댐 성토고가 높아짐에 따라 Fig. 2(d)에서 볼 수 있는 바와 같이 등변위선이 최대변위가 일어나는 댐 중앙부를 중심으로 하여 동심원 모양으로 분포하고 있다. 이 같은 현상은 일반적인 사력댐에서 발생하는 변위 분포와 유사하며 시공 중의 계측결과 (최대값 약 10.5 cm)와도 일치하고 있다.

한편, Zone별 침하량을 살펴보면 Zone 3 (Graded Rock-Fill Zone)이 Zone 4 (Rock-Fill Zone) 보다 침하가 약간 더 많이 발생하였으며, 이는 축조재료의 강도 등에 따른 차이로 판단된다.

댐체 높이가 52 m이고 연직변위가 10.5 cm 정도이므로 변형률은 0.2 % (0.105 m/52 m)로 매우 작고 연직변위 경향이 수렴되어 가고 있으므로 댐체의 연직변위에 대한 거동 양상은 안정한 것으로 판단된다.

댐체 내에서 발생하는 연직, 수평응력에 따라 Weak Zone을 검토하는 것은 댐체의 안정에 매우 중요한 요소로 간주되는데 본 연구에서는 댐체 내에 설치된 계측기에 의한 분석과 응력-

Table 2 Hyperbolic model parameters

	Modulus number for primary loading K	Modulus number for bulk modulus K_b	Bulk modulus exponent m	Exponent for loading behavior n	Failure ratio R_f	Cohesion C (kN/m ²)	Friction angle Φ (deg)	Dry unit weight γ_d (kN/m ³)
ZONE-1	1,640	1,505	-0.69	-0.235	0.736	0	45	22.25
ZONE-2	715	475	-0.125	0.24	0.745	0	45	21.07
ZONE-3	1,769	869	0.87	0.533	0.75	0	45	21.07
ZONE-4	1,769	869	0.87	0.533	0.75	0	39	19.89
ZONE-5	300	150	0.5	0.6	0.75	0	30	17.64
Concrete face	60,000	60,000	0	0	0	0	60	24.5

Fig. 2 Settlement distribution under construction (unit: m)

Fig. 3 Vertical stress distribution after construction (unit: t/m^2)

Fig. 4 Position of multi-layer settlement meter (M-1 ~ M-10)

No.	Location (EL. m)
M-10	120.1
M-9	115.0
M-8	110.0
M-7	106.0
M-6	102.2
M-5	97.8
M-4	94.4
M-3	90.1
M-2	84.4
M-1	78.1

변형률 검토를 위한 수치해석을 방법을 적용하여 댐체 내부 응력을 분석하였다.

Fig. 3은 축조 완료후의 연직응력 분포를 나타낸 것으로 삼각형 형상으로 하부로 갈수록 연직응력분포가 증가하는 것으로 나타났다. 한편, Bedding Zone 및 Transition Zone의 경계면에서 재료의 강성 차이에 기인한 것으로 보이는 약간의 응력 전이가 발생하였다. 연직응력 및 수평응력 분포에서 댐체의 안정성에는 크게 문제가 될 만한 요인이 없어 축조과정중의 댐체의 거동은 전반적으로 안정한 것으로 사료된다.

3. 수치 해석 결과와 계측치 비교

계측데이터 분석 방법에는 계측치와 허용기준치를 비교·검토하는 방법과 계측데이터의 변화 추이를 분석하는 방법이 있다. 필댐 (CCRD & CFRD)에서의 계측기록으로 댐의 안전성을 평가하는 가장 기본적인 방법은 허용기준치와 비교하는 것이다. 그러나 허용기준치는 댐의 재령 및 모든 측정 자료가 미비한 상태에서 선정되어 일반적인 참고자료로 이용되고 있거나, 혹은 허용기준치가 설정되어 있지 않은 댐이 대부분이다. 따라서, 댐 안전의 실질적인 허용기준치 설정은 수년간의 장기적인 측정자료 및 댐 만수시와 홍수시 수문방류를 경험한 후 현장특성을 고려해서 설정되어야 하므로, 모델댐의 계측데이터 분석 방법은 계측데이터의 추이를 분석하는 방법을 적용하였다.

Fig. 4는 건설기간 중에 발생하는 침하량을 계측하기 위해 설치된 층별침하량의 설치 위치를 나낸 것이고, Fig. 5는 건설기간 중에 발생한 층별침하량을 수치해석결과와 비교하여 나타낸 것이다. Fig. 5에서 수치해석 결과는 EL. 90.1 m와 120.1 m에서는 계측 결과와 잘 일치하고 있으나, EL. 102.2 m와 EL. 115.0 m에서는 계측 결과보다 침하량을 크게 예측하고 있다. 계측의 경우 완전한 포물선 형태가 아니라 활 (弓)형 모양을 나타내는데, 이러한 원인은 축조일수와 축조층의 두께가 일정

하지 않기 때문인 것으로 보인다. 수치해석 결과는 62단계 성토 (Planting Zone 포함 68단계)로서 성토 두께가 일정하고 성토 주기 (시간, t)도 동일하지만 실제시공은 그렇지 않기 때문에 이와 같은 형태로 도시되고 있는 것으로 판단된다.

Fig. 6은 정규화한 CFRD의 댐 높이와 내부침하량과의 관계

Fig. 5 Internal settlement distribution in construction period

Fig. 6 Generalized height vs. generalized internal settlement of CFRD

를 도시한 것으로 국내·외 CFRD의 축조 중 침하량의 경향을 모델링의 결과와 비교한 그림이다. Foz do Areia는 브라질에, Miryang과 Jangheung은 우리나라의 경남 밀양과 전남 장흥에 위치한 CFRD로서, Fig. 6에서 볼 수 있듯이 CFRD의 축조 중 최대 침하량은 댐 높이의 중앙 (대략 0.4 ~ 0.6H)에서 발생하며 그 추세는 포물선 형태임을 알 수 있다 (He, 2000; Kwater, 2010).

Fig. 6을 통해 모델링도 국내·외 CFRD의 축조 중 침하량 경향과 유사한 것을 알 수 있으며, Fig. 5에서 확인 한 바와 같이 CFRD의 축조 중 침하량은 대략 0.2 % 내외이며 이러한 침하 경향은 CFRD의 축조 중 거동의 일반적인 범위로서 안정한 것으로 판단된다.

한편, 댐 건설 중 침하량을 분석하기 위해 액상침하계를 설치하였는데, 액상침하계를 설치한 지점의 위치를 Fig. 7에 도시하였다. 또한 액상침하계의 계측 결과와 수치해석에 의한 예측치를 비교하여 Table 3에 나타내었다. Fig. 7에서 액상침하계의 계측 결과, EL. 94 m 및 EL. 110 m에 설치된 12개의 액상침하계중 5개 (SC-1, SC-9 ~ SC-12)는 댐이 융기된 것으로 측정되었는데, 실제 댐의 축조과정을 볼 때 이러한 융기현상이 발생할 가능성은 희박하므로 계측 오차로 판단되어 계측 결과 분석에서는 제외하였다.

Table 3에서 살펴보면, SC-2 ~ SC-8의 액상침하계의 계측 결과에서 대체적으로 댐의 중앙부에서 침하가 크게 발생하는 경향은 일치하고 있다. 다만 댐 사면측에서 계측치가 너무 작

Table 3 Measured and predicted results of internal settlement

Location	Measured (cm)	Predicted (cm)	Differences (cm)
SC-2	2.23	3.15	0.92
SC-3	5.57	7.14	1.57
SC-4	6.57	7.19	0.62
SC-5	5.05	6.67	1.62
SC-6	0.93	4.20	3.27
SC-8	2.64	6.50	3.86

Fig. 7 Measured results of liquid settlement cell

게 예측된 것은 예측의 오류로 판단되며, 이는 현장에서 발생할 수 있는 축조 시간, 다짐 방법 등 다양한 댐 축조환경과 관련될 수 있는 것으로 판단된다. 댐 중앙부인 SC-4 및 SC-5의 경우 계측 결과와 수치해석 결과의 차이는 0.62 cm 및 1.62 cm로서 거의 유사한 값을 예측한 것을 볼 수 있다.

Fig. 2 ~ Fig. 7 및 Table 3에서 살펴 본 바와 같이 본 연구에서 수행한 수치해석을 이용한 CFRD의 축조 중 침하 거동 분석은 타당한 결과를 예측한 것으로 평가된다.

IV. 축조 단계에서의 축조 완료 후 침하량 예측

Fig. 5 및 Fig. 6에서 고찰한 바와 같이 댐 축조 중의 침하량과 댐 높이의 관계는 포물선 형태가 된다. 따라서 댐의 축조 중 깊이에 따른 침하량 분포는 포물선 방정식을 이용하여 식 (1)과 같이 구할 수 있다.

$$s = \left(\frac{4 S_{\max}}{H^2} \right) h (H - h) \quad (1)$$

여기서, S : 댐에서의 연직 위치 h 에서의 침하량

$S_{\max}$: 축조된 댐의 높이 H 에서의 최대 침하량

H : 축조된 댐의 높이

h : 댐에서의 연직 위치

일정 높이까지 축조된 댐 높이 (H)에서 그 때까지의 최대침하량을 알면 식 (1)을 이용하여 축조 완료 후의 최대침하량을 예측 할 수 있다. 즉 식 (1)에서 최대침하량 $S_{\max}$ 와 축조된 댐 높이 H 와의 관계에서 가칭 침하계수 (α)를 얻을 수 있다. 즉 침하계수 (α)는 식 (2)과 같이 표현된다.

$$\alpha = \frac{4 S_{\max}}{H^2} \quad (2)$$

Fig. 8은 Fig. 5를 지반고가 아닌 댐 높이로 수정하여 축조 중 침하량과의 관계를 도식한 것으로서 댐 높이가 26.6 m와 50.1 m일 때 수치해석을 이용하여 예측한 결과 (predicted)와 계측 결과 (measured)를 간편 예측식 (식 (1))을 이용하여 계산한 결과 (calculated)와 함께 표현한 것이다. Fig. 8에서 20.6 m 및 50.1 m의 예측 결과 (predicted)와 계측 결과 (measured)는 Fig. 5의 EL. 90.1 m 및 EL. 120.1 m의 결과와 동일한 것을 볼 수 있다.

Fig. 8에서 계산 결과 A (calculated A)는 26.6 m에서의 최

Fig. 8 Measured, predicted and calculated results of Internal settlement

대침하량 ($S_{\max}$) 2.9 cm를 식 (1)에 대입하여 도식한 것이고, 이 때의 침하계수 (α)는 식 (2)에 대입하여 0.0164를 얻을 수 있다. 이 침하계수를 이용하여 50.1 m에서의 침하량을 예측한 것이 계산 결과 B (calculated B)인데 계측 결과와 잘 일치하는 것을 볼 수 있다. 한편, 축조 완료 후 침하량을 식 (1)에 대입하면 계산 결과 C (calculated C)와 같이 도식된다.

따라서 축조 단계에서 얻은 침하량을 식 (1) 및 식 (2)를 이용하면 축조 완료단계에서의 침하량을 예측할 수 있다. 이러한 간편식은 여러 여건상 수치해석을 수행하기 곤란한 측면이 있는 댐 현장에서 손쉽게 활용될 수 있을 것으로 사료된다.

V. 결 론

본 연구에서는 증분방법을 이용한 축조 단계별 CFRD의 응력-변형 거동해석을 수행하여 안정성을 검토하고 계측자료 분석을 통하여 수치해석의 타당성을 검증하였다. 또한 댐 축조 단계에서 축조 완료 단계의 침하량을 예측하는 간편식을 제안하였다. 본 연구의 주요한 결론은 다음과 같다.

1. CFRD 형식의 모델댐을 선정하여 축조 중 침하량을 분석한 결과, 국내·외의 CFRD 축조 중 침하 경향과 유사한 포물선 형태를 보였으며, 최대 침하량은 댐 높이의 중앙 (대략 0.4 ~ 0.6 H)에서 나타났다.
2. 축조 단계에서 침하량을 알면 본 연구에서 제안된 포물선 방정식 형태의 침하 계산 간편식을 이용하여 축조 완료단계에서의 침하량을 예측할 수 있다.
3. 본 연구에서 제안된 침하 계산 간편식은 모델댐의 계측 결과와 거의 유사한 값을 나타내어 그 적용성이 검증 되었으며,

여러 여건상 수치해석을 수행하기 곤란한 댐 현장에서 손쉽게 활용될 수 있을 것으로 판단된다.

이 논문은 2010년 정부(교육과학기술부)의 재원으로 한국연구재단의 지원(No. 2010-0015476) 및 강원대학교 석재복 함건설신소재연구소의 기자재 지원으로 수행되었으며 이에 감사드립니다.

REFERENCES

1. Chang, P. W., C. S. Song, Y. K. Park, C. W. Woo and W. J. Won, 1997. Studies on structural degradation of agricultural reservoirs in Kyungki Province. *Journal of the Korean Society of Agricultural Engineers* 39(4): 90-97 (in Korean).
2. Chang, O. S. and C. K. Lee, 2004. Deformation characteristics of earth dam raised by non-homogeneous fill materials. *Journal of the Korean Geotechnical Society* 20(8): 1-14 (in Korean).
3. Duncan, J. M., 1996. State of the art: Limit equilibrium and finite-element analysis of slopes. *Journal of Geotechnical and Geoenvironmental Engineering* 122(7): 577-596.
4. Duncan, J. M. and C. Y. Chang, 1970. Nonlinear analysis of stress and strain in soils. *Journal of the Soil Mechanics and Foundation Division, ASCE* 96(SM5): 1629-1654.
5. Habibagahi, G., 2002. Post-construction settlement of rockfill dams analyzed via adaptive network-based fuzzy inference systems. *Computers and Geotechnics* 29: 211-233.
6. He, G., 2000. Technical study on crest overflow of concrete faced rockfill dams. In *Proc., Int. Symp. on Concrete Faced Rockfill Dams*, 283-291. Beijing, : ICOLD.
7. Hunter, G. and R. Fell, 2003. Rockfill modulus and settlement of concrete face rockfill dams. *Journal of Geotechnical and Geoenvironmental Engineering* 129 (10): 909-917.
8. Im, E. S., M. S. Seo, I. S. Ha and W. G. Kim, 2005. Simulation of earth-fill dam behavior subjected to water level variation using geotechnical centrifuge. *Journal of the Korean Society of Civil Engineers* 25 (2C): 95-102 (in Korean).
9. Justo, J. L. and P. Durand, 2000. Settlement-time behavior of granular embankments. *International Journal for Numerical and Analytical Methods in Geomechanics* 24: 281-303.
10. Khalid, S., B. Singh, G. C. Nayak and O. P. Jain, 1990. Nonlinear Analysis of Concrete face rockfill dam. *Journal of Geotechnical and Geoenvironmental Engineering* 116(5): 822-837.
11. Kim, S. K. and H. D. Lim, 1987. Finite element analysis on the behavior of Soyganggang dam and its comparison with observed. *Journal of the Korean Society of Civil Engineers* 7(1): 141-150 (in Korean).
12. Kim, Y. S. and B. T. Kim, 2008. Prediction of relative crest settlement of concrete-faced rockfill dams analyzed using an artificial neural network model. *Computers and Geotechnics* 35: 313-322.
13. Kim, S. K., S. G. Han, M. H. Lee and S. R. Ahn, 2001. An evaluation of stress-strain behavior of earth-rockfill dam and causes of crack due to water table fluctuation. *Journal of the Korean Geotechnical Society* 17(6): 149-162 (in Korean).
14. Kim, Y. S., B. J. Kim, D. H. Shin and H. G. Park, 2006. Settlement behavior prediction of CFRD after impounding. *Journal of the Korean Society of Civil Engineers* 26(3C): 209-218 (in Korean).
15. Korea Water Resources Association, 2005. Dam design criteria (in Korean).
16. Kulhawy, F. H., J. M. Duncan, and H. B. Seed, 1969. Finite element analysis of stress and movements in embankment during construction. Report No. TE-69-4, University of California, Berkely.
17. Kwater, 2010. Dam integration information system. Technical rep., Korea Water Resources Corporation, Korea.
18. Min, H. G. and D. W. Lee, 2008. Prediction of excess pore water pressure of reservoir embankment on soft ground. *Journal of the Korean Society of Agricultural Engineers* 50(2): 37-44 (in Korean).
19. Ozkuzukiran, S., M. Y. Ozkan, M. Ozyazicioglu and G. S. Yildiz, 2006. Settlement behavior of a concrete faced rock-fill dam. *Geotechnical and Geological Engineering*

- 24: 1655-1678.
20. Park, C. S., H. D. Lim and S. Y. Park, 1995. Postconstruction settlement prediction of rockfill dam. *Journal of the Korean Society of Civil Engineers* 15(2): 501-510 (in Korean).
21. Park, H. G., Y. S. Kim, M. W. Seo and H. D. Lim, 2005. Settlement behavior characteristics of CFRD in construction period. *Journal of the Korean Geotechnical Society* 21(7): 91-105.
22. Saboya, F. and P. M. Byrne, 1993. Parameters for stress and deformation analysis of rockfill dams. *Canadian Geotechnical Journal* 30: 690-701.
23. Seo, M. W. and Y. S. Kim, 2007. Centrifuge test for simulating behavior of CFRD during initial impounding. *Journal of the Korean Geotechnical Society* 23(10): 109-119 (in Korean).
24. Seo, M. W., Cho, S. E. and D. H. Shin, 2008. Effect of characteristics of sand/gravel and rock materials on behavior of dam during construction and impounding. *Journal of the Korean Geotechnical Society* 24(6): 45-55 (in Korean).
25. Seo, M. W., I. S. Ha, Y. S. Kim and S. M. Olson, 2009. Behavior of concrete-faced rockfill dams during initial impoundment. *Journal of Geotechnical and Geoenvironmental Engineering* 135(8): 1070-1081.
26. Shin, J. H., 2003. A study on the behavior of an earth and rockfill dam due to reservoir water. *Journal of the Korean Geotechnical Society* 19(6): 61-70.