

모형실험에 의한 콘크리트 표면차수벽형 석괴담의 주응력비 특성 분석

Characteristics Analysis of Principal Stress Ratio in Concrete Faced Rockfill Dam Using a Model Test

김 용 성*
Kim, Yong-seong

Abstract

In present study, the principal stress condition needed to conduct cubical large-scale triaxial test which can reflect three dimensional stress condition (or plain strain condition) in a dam was investigated by performing model test and numerical analysis and the principal stress ratio varying with the height of CFRD was examined. Also, the principal stress ratio in CFRD body was investigated from the monitoring results of horizontal and vertical earth pressure gages, installed in the center zone and lower part of transition zone of the dam body, respectively, in order to consider the principal stress condition in the large-scale triaxial test to model the behavior of CFRD. The result of the study indicated that the principal stress ratio decreased gradually from the lower to the upper part in the dam body for its center axis and was about 0.5 and 0.2 in the lower and upper part, respectively.

Keywords : Concrete faced rockfill dam, Principal stress ratio, Model test, Rock-fill, Hyperbolic model

I. 서 론

최근의 수치해석의 비약적인 발전을 고려하면 댐 축조면에 대한 주응력비, 즉 강도이방성과 비선형 거동 특성 등 재료 본래의 성질에 관심이 높아 보다 더 높은 정도의 역학적 파라메타가 연구면에서

는 물론 실무면에서도 요구된다고 할 수 있다.

일반적으로 다져진 댐 재료는 다짐 재하 조건에 따라 축조재료 입자들이 배열되므로 고유의 이방성을 지니게 된다. 중력하에서 자연적으로 퇴적된 거의 모든 입상체와 다짐한 입상체의 강도는 보편적으로 강한 강도 이방성을 갖고 있고, 그 경향은 매우 광범위한 조건하에서는 매우 공통적이다(Oda; 1972, 1978, 1981, Arthur; 1972, 1977, 1988, Lam; 1988, Tatsuoka; 1986).

실제 댐의 응력·변형해석을 위해서는 3차원 조건 또는 평면변형을 조건하에서의 해석이 필요하며,

* 소방방재청 방재대책팀 토목사무관
* Corresponding author. Tel.: +82-2-2100-5412
Fax: +82-2-2100-5419
E-mail address: nakisuna@nema.go.kr

이 경우에 있어서는 각각의 조건하에서의 이방성의 영향을 고려해야 한다. 따라서 정확한 댐 거동 특성을 파악하기 위해서는 등방시험 보다 K_0 압밀(압축) 후 전단시험을 통하여 대상 축조재료의 전단특성을 파악해야 함에도 불구하고 실험상의 어려움과 장비의 부족으로 대부분의 설계에서는 등방시험의 결과를 이용하고 있다. 이럴 경우 등방압밀(압축) 시 가해지는 높은 평균주응력과 고유한 이방성의 파괴로 인하여 전단강도를 과대평가하는 경우가 발생하게 되고 과다 설계로 이어질 가능성이 매우 크다.

댐체의 응력변형 거동을 정확하게 예측하기 위해서는 사용하중 하에서 실제로 일어나는 변형을 수준을 토대로 해석하는 것이 필요하다. 최근까지의 수치해석적 방법에 의한 예측 기법은 주로 댐의 파괴상태에 주안점을 두고 개발되어 왔다. 하지만 파괴 이전 댐의 변형을 예측하는데 있어 이러한 기법은 적절하지 못하며, 파괴 이전의 변형률 수준에 대해 초점을 맞춘 해석 및 예측기법의 개발이 필요하다.

파괴이전 상태의 낮은 변형률 수준에서 나타나는 댐체 변형에 대한 가장 큰 두 가지 특징 중의 하나는 댐 재료의 응력-변형률 관계에서 나타나는 비선형성이다. 응력-변형률 관계의 비선형성은 변형률 변화에 따른 강성(stiffness)의 변화로 나타난다. 공진주시험을 통해 얻은 전단변형률에 따른 전단계수(shear modulus)의 변화가 대표적인 경우이다.

다른 하나의 특징으로는 댐 재료의 변형 이방성이다. 축조과정을 통해 축조재료는 수평방향의 조직적 입자배열을 통해 이방성이 나타나며, 수평방향과 연직방향의 강성이 서로 다르게 나타난다. 따라서 수평방향의 변형과 연직방향의 변형은 서로 다르게 나타난다.

따라서 이러한 비선형성과 이방성을 정확하게 예측하기 위해서는 비선형성과 이방성을 충분히 예측할 수 있는 구성모델이 필요하며, 요소 시뮬레이션

으로 그 구성모델의 타당성을 검토할 수 있을 것이다. 요소 시뮬레이션을 위해서는 먼저 지반조건을 충족하는 삼축시험기가 전제되어야 하므로 입방체형 삼축시험기는 정확한 댐체 거동분석을 위해 기본적인 필수 장비라 할 수 있다.

본 연구에서는 3차원 응력조건하에서 실험이 가능한 입방체형 대형삼축시험기 필요한 주응력 조건을 모형실험 및 수치해석 결과로서 비교 분석하고 콘크리트 표면차수벽형 석피댐(Concrete faced rockfill dam, 이하 'CFRD'라 한다) 높이에 따른 주응력비의 변화를 고찰하고자 하였다. 또한 댐체의 중앙 및 선택존(Transition zone) 하부에 설치된 수직 및 수평토압계의 계측 결과로부터 체체의 주응력비(수평응력/수직응력)의 변화양상을 파악하고 추후 댐체의 거동 분석에 필요한 대형삼축시험 주응력 조건에 반영하고자 하였다.

II. CFRD 모형실험

1. 모델댐 현황

울산권 광역상수도 사업의 취수원으로 건설된 대곡댐은 낙동강 수질관리 개선대책의 일환으로서 울산지역의 깨끗하고 안정된 생활용수 공급을 위하여 추진되었으며, 사면댐으로부터 상류지역의 약 8.5 km인 태화강 수계의 제1지류인 대곡천의 중류에 위치한다. 행정구역상으로는 울산광역시 울주군 두동면 천전리에 해당되며, 댐 형식은 CFRD으로서 댐 높이가 52.0 m, 댐 길이 190.0 m의 중규모 댐이다. 표면차수벽 직하부에는 차수벽 지지존(Bedding zone, 이하 'Bedding zone'이라 한다) 및 선택존(Transition zone, 이하 'Transition zone'이라 한다)을 두어 표면차수벽의 기층역할을 담당하게 하고 시공 및 완공 후 표면차수벽을 통한 누수의 통과를 가능한 한 억제하도록 설계되었다. 차수벽 콘크리트는 30 cm의 두께와 0.40%의 철근비를 가지고 있으며, 댐 상류사면은 1:1.4의 경사를 유지하고, 하류

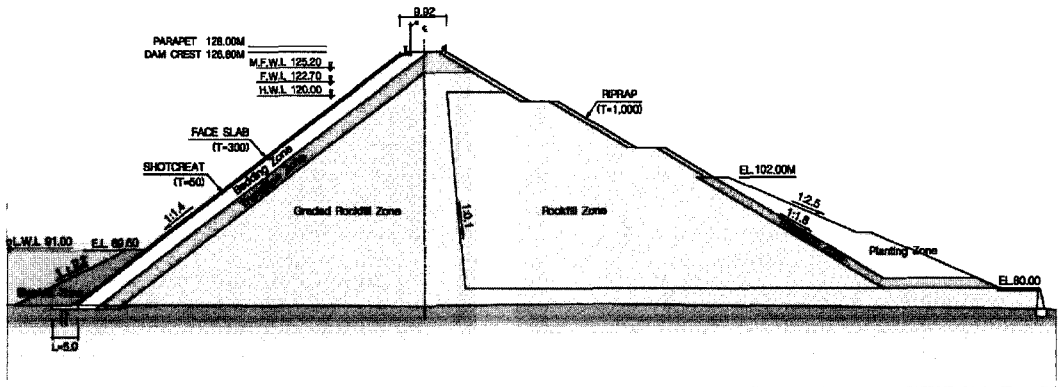


Fig. 1 Cross-section of Daegok dam

Table 1 General features of Daegok dam

List	Unit	Contents
Level of dam crest	EL. m	126.8 (including 1.2 m of Parapet wall: 128.0 m)
Height of dam	m	52
Length of dam	m	190
Width of dam	m	9.5
Volume of dam	10 ³ m ³	470
Side slope of dam	V:H	Upstream 1:1.4, Downstream 1:1.8

면 경사는 1:1.8의 완만한 경사를 유지하고 있다. 본 댐의 하류사면에는 EL.102.0 m까지 친 환경성토층과 침투수 집수벽이 설치되었다(Fig. 1 참조).

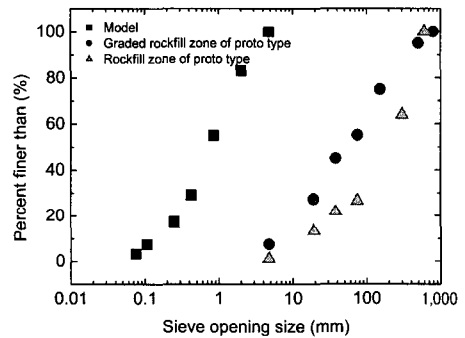


Fig. 3 Percent finer than of materials used for the model & prototype

2. CFRD의 모형실험

대곡댐의 모형실험은 1/150의 스케일로 수행되었으며 위치에 따른 주응력비(수평/수직)를 고찰하

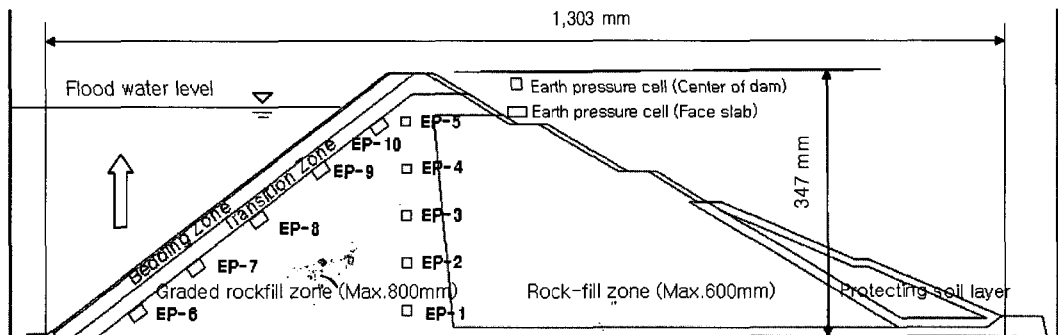


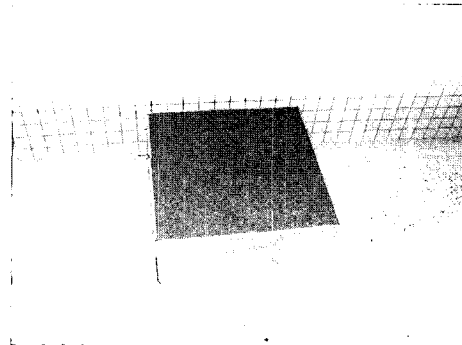
Fig. 2 Cross-section of the model test (Daegok dam 1/150)

는데 주요한 목적이 있다. 모형과 실물이 상사관계에 있다고 하는 것은 모형과 실물에서 발생하는 현상에 포함되어진 전체 변수가 상관계에 있다는 것을 의미한다. 그러나 실물의 현상을 다른 방법을

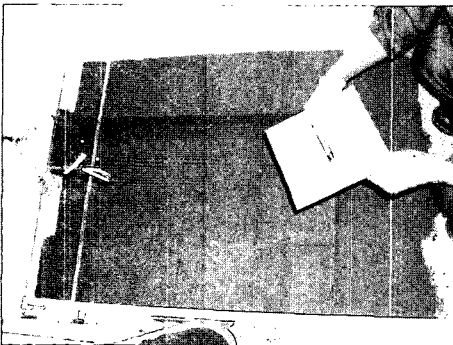
이용하여 구하기 때문에 엄밀히 말하면 완전한 상사관계를 달성하는 것은 불가능하다고 할 수 있다. 그러므로 상사 법칙이란 필요한 범위에서 필요한 정도로 현상을 예측하는데 필요한 것이라 할 수 있다.



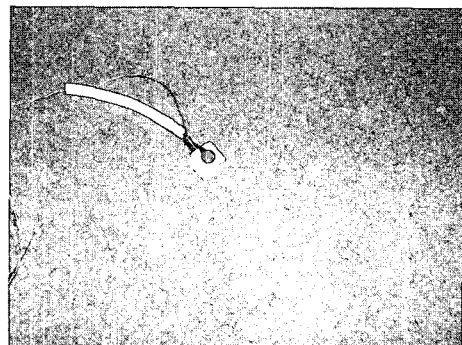
(a) Preparation of the model test



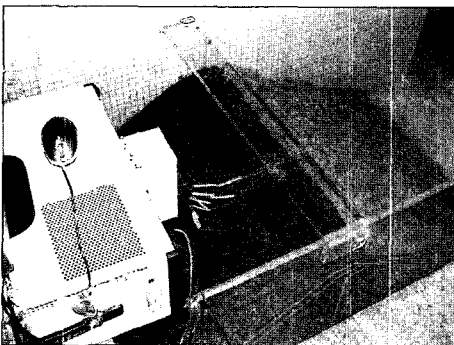
(b) A block for construction



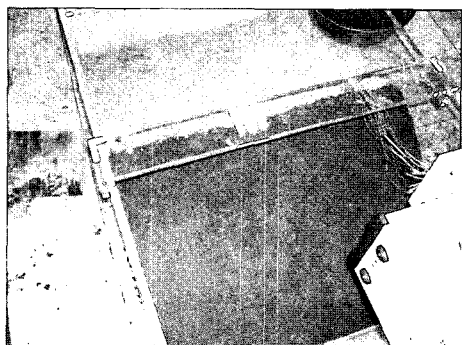
(c) Construction of the model by stages



(d) Earth pressure meter for measurement



(e) Data logging system



(f) Construction of face slab & rip-rap

Photo 1 Process of the model test

일반적으로 1G 場에서의 모형실험의 상사법칙은 다음의 가정이 성립된다는 조건에서 유도되어 진다 (Im 등, 2005).

- ① 실물에 사용된 재료는 하나의 물리적 공학적 특성(응력-변형률-시간 관계 등)을 가지고 있다.
- ② 모형의 재료는 실물의 재료와 동일한 물리적 공학적 특성을 가진다.

Fig. 2는 대곡댐 모형실험에서의 토압계(수직 및 수평) 설치도를 나타낸 것으로 댐 중심축과 Transition zone 하부에 각 5개씩 10개를 설치하였다.

석괴 재료(1 m 내외)의 입자의 영향은 실제 실험실에서 실제 크기의 실험을 수행할 수가 없으므로 상사입도법(scaling down technique)을 사용한 실험 결과를 이용하여 실제 크기의 재료에 대한 강도를 추정하는 것이 일반적이다(정철민 등, 2002). Fig. 3은 대곡댐 축조재료 및 대곡댐의 모형실험에 사용된 재료의 입경 가격 곡선을 도시한 것으로 대곡댐의 주암석존(Graded rockfill zone, 이하 'Graded rockfill zone'이라 한다) 및 보조암석존(Rockfill zone, 이하 'Rockfill zone'이라 한다)의 약 1/150로 축소된 입경으로 모형댐을 축조하였다. Bedding zone과 Transition zone의 입경은 최대 입경의 1/150 입경으로 하여 모형실험에 사용되어 졌다. 대곡댐 모형실험을 위한 축조과정은 Photo 1과 같으며 축조시 함수비는 6.29%, 습윤밀도는 2.0 t/m³로 다짐하였다. 다짐은 초기 다짐과 재다짐 방법으로 나누어 진행되었으며 초기 다짐시에는

Photo 1(b)의 축조용 상자에 습윤밀도가 2.0 t/m³이 되도록 다짐 후 모형실험용 댐을 축조하였으며 축조과정 중에도 다짐을 위해 특수 제작된 다짐판 등으로 재다짐을 실시하였다. 축조에 사용된 시료의 중량은 사전에 계량되었으며 축조 후 모형댐의 부피를 측정하여 전체 습윤밀도를 산정하였다.

Table 2는 모형실험에서 얻어진 토압비 분포를 나타낸다. 댐 중심축에서는 하부에서 0.417, 상부에서 0.236으로 상부로 갈수록 토압비가 낮았으며 전체적으로 0.3내외의 토압비를 나타냄을 알 수 있다. Transition zone과 Graded rockfill zone의 경계면에서는 0.713에서 상부로 갈수록 높아지다가 다시 낮아져 상부에서는 0.425를 기록하였다.

III. CFRD의 수치해석

CFRD 댐체의 거동 평가시 유의해야 할 사항으로는 축조과정에서의 침하와 수평변위, 응력의 증가, 축조 후 담수에 따른 변위 및 응력의 재배열, 지진시의 동적 응답거동, 시간경과에 따른 장기적 크리프 거동 등으로 구분할 수 있다. 본 연구에서는 범용 지반해석 프로그램을 사용하여 축조과정에서의 응력의 재배열에 대하여 분석하였으며, Kondner (1963)가 제안하고 Duncan and Chang(1970)이 발전시킨 쌍곡선 모델을 적용하여 대곡댐의 거동을 해석하였다.

CFRD에 대한 유한요소해석을 위해서는 축조재료의 응력-변형률 특성을 합리적으로 수치화하는 것이 가장 중요한 과제이다. 많은 연구자들이 지반 재료의 응력-변형률 관계를 모사하기 위해 노력하였으나, 대부분의 모델들은 수치화 과정에서 불가피한 가정조건들을 수반하여 특정한 토질 및 국부적인 응력 범위 내에서만 그 타당성이 입증되어 왔다. 한편 그동안의 문헌조사를 통하여 각 모델이 댐의 거동해석에 적용된 예를 검토한 결과 쌍곡선 모델이 비교적 토질의 변화에 따른 파라미터의 결정이 용이할 뿐만 아니라, 기존의 댐들에 대한 거

Table 2 Earth pressure ratio distribution of the model test

Location (GL. m)	Earth pressure ratio at center of dam	Earth pressure ratio at transition zone
2	0.417	0.713
8	0.315	0.795
14	0.264	0.737
20	0.248	0.556
26	0.236	0.425

Table 3 Hyperbolic model parameters used in this study (after Kim et al., 2006)

Zone	K	K_b	m	n	R_f	c (kN/m ²)	ϕ (deg)	γ_d (kN/m ³)	비고
Bedding	400	330	0.05	0.39	0.7	0	45	22.25	
Transition	400	350	0.05	0.39	0.7	0	45	21.07	
Graded rockfill	900	750	0.4	0.5	0.7	0	44	21.07	
Rockfill	800	700	0.4	0.5	0.7	0	42	19.89	
Planting	300	150	0.5	0.6	0.7	0	30	17.64	
Concrete face	60000	60000	0	0	0	0	60	24.50	

동해석에서 만족스런 결과를 보여 온 것으로 알려져 있다(Marachi 등, 1972; Duncan and Chang, 1970; Duncan 등, 1980; 김상규 & 임희대, 1987). 본 해석에서는 그동안 사력댐 등의 해석(김상규 등, 2001; 장옥성 & 이종규, 2004, 김용성 등, 2006)을 통하여 정확성이 어느 정도 검증된 캐나다의 GEO-SLOPE사에서 개발한 SIGMA/W를 사용하여 댐의 건설과정의 거동을 분석하였다.

Table 3은 본 해석에 적용된 토질 강도정수(Hyperbolic model)를 나타낸다(김용성 등, 2006). 댐체 내에서 발생하는 연직, 수평응력에 따라 연약대(Weak Zone)를 검토하는 것은 댐체의 안정해석에 매우 중요한 요소로 간주된다. 필댐은 일반적으로 계곡부에 축조되므로 양안(abutments)으로 갈수록 단면은 작아지며, 중앙부가 최대 횡단면이 된다.

Fig. 4 및 5는 각각 축조 완료후의 연직응력 및 수평응력 분포를 나타낸 것으로 삼각형 형상을 이루고 하부로 갈수록 연직응력분포가 증가하고 수평응력 분포는 반타원형 형상의 변위 분포를 보이는 것으로 나타났다.

일반적으로 연직응력의 경우 댐단면에서 수평적으로 동일한 위치의 서로 다른지점에서 댐 축조재료에 의한 상재하중과 댐체내에서 발생하는 연직응력의 비는 댐단면의 중앙부에서 작고, 상하류측 사면에 가까울수록 증가한다. 이것은 연성의 성토재료로 축조된 댐에 있어서 중앙하부로 작용되어야 할 성토재료의 자중 일부가 상하류측 사면방향으로

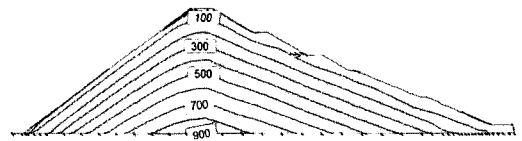


Fig. 4 Distribution of vertical stress after construction (unit, kN/m²)

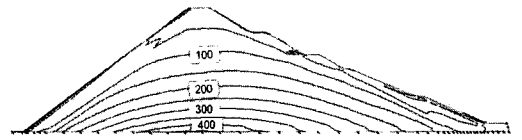


Fig. 5 Distribution of horizontal stress after construction (unit, kN/m²)

전이되기 때문이다(Khalid 등, 1990). 본 연구에서도 일반적인 CFRD의 응력 분포 형태와 동일한 양상을 나타내었다.

IV. 고 찰

Fig. 6은 모형실험 및 수치해석으로 얻어진 주응력비 분포를 나타낸다. 댐 중심축에서는 하부에서 상부로 갈수록 주응력비가 낮아짐을 알 수 있으며 대체적으로 댐 중심 하부(EL. 78.9 m)는 0.442(모형실험 0.417), 중앙부(EL. 95.8 m)는 0.285(모형실험 0.264), 상부(EL. 114.5 m)는 0.248(모형실험 0.236) 정도로 나타났다. 이는 실험 결과와도 거의 일치하는 결과로서 현재 댐 설계 및 건설시 실시되는 수치해석에서 사용되는 토질정수

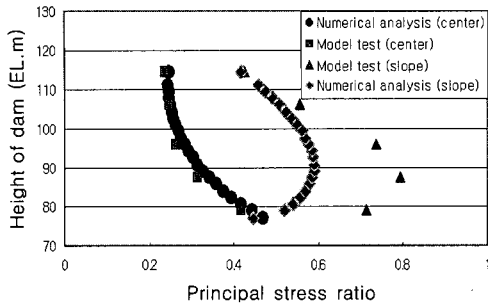


Fig. 6 The results of the model test and numerical analysis

를 등방삼축시험(주응력비 1.0)에서 얻고 있음이 큰 오류를 내포하고 있음을 역설적으로 설명해 주고 있다.

한편 Transition zone과 Graded rockfill zone의 경계부에서의 주응력비는 모형실험의 경우 댐 하부(EL. 78.9 m)는 0.521(모형실험 0.713), 중앙부(EL. 95.8 m)는 0.578(모형실험 0.737), 상부(EL. 114.5 m)는 0.418(모형실험 0.425) 정도로 나타났다. 이러한 차이는 우선 실험의 경우 Face slab의 두께가 대곡댐 원형(prototype, 30 cm)의 1/150인 경우 모형실험에서는 2 mm로 타설되어야 하나 시멘트 모르타르를 현실적으로 그렇게 얇게 실험에 적용하기에는 무리가 있어 약 5~7 mm 정도로 한 점, 둘째로는 계측기기의 설치위치에 대한 정확한 계량이 수치해석에 비하여 다소 애매할 수 있는 점, 수치해석에서의 포아송비(Poisson's ratio)가 정확한 실내실험 값에서 얻어진 것이 아니라 예측된 값을 입력함으로써 수치해석에서 발생할 수 있는 오차가 존재한다는 점 등 여러 원인을 들 수 있다.

본 연구를 통해 CFRD에서의 높이에 따른 주응력비 분포현황 및 상류사면의 Transition zone에서의 주응력비 분포현황을 알 수 있었으며 특히 댐체 거동해석시 사용되는 등방 삼축시험 적용의 오류에 대해서는 충분히 이해할 수 있는 계기가 되었다. 등방 삼축시험은 수평하중에 수직응력과 동일한 하중을 가함으로서 전단강도의 과대평가를 야기

할 수 있으며 이는 대형댐 건설시 막대한 경제적 손실과 직결될 수 있으므로 입방체형 대형삼축시험기 개발이 시급히 요청된다 하겠다.

V. 결 론

본 연구에서는 3차원 응력조건(또는 평면변형을 조건)하에서 실험이 가능한 입방체형 대형삼축시험시 필요한 주응력 조건을 모형실험 및 수치해석 결과로서 비교 분석하고 CFRD의 높이에 따른 주응력비의 변화를 고찰하고자 하였으며, 본 연구를 통해 얻어진 주요한 성과는 다음과 같다.

1) 실내모형실험 및 수치해석을 통해 댐체가 받는 주응력비 분포 특성에 대하여 살펴본 결과, 댐 중심축에서는 하부에서 상부로 갈수록 주응력비가 낮아짐을 알 수 있으며, 대체적으로 댐 중심 하부는 0.5 내외 상부는 0.2보다 조금 큰 정도로 나타났다.

2) Transition zone과 Graded rockfill zone의 경계부에서의 주응력비는 모형실험의 경우 0.7 내외에서 상부로 갈수록 0.4 부근까지 이르며, 수치해석 결과의 경우에는 0.55~0.6 정도에서 상부로 갈수록 0.4에 가까워지는 것으로 나타났다.

3) 현재 댐 설계 및 건설시 실시되는 수치해석에서 사용되는 토질정수를 등방삼축시험으로부터 얻고 있으며, 이는 전단강도의 과대평가를 야기하는 것으로 판단된다.

References

1. Arthur, J. R. F. and Menzies, B. K., 1972, "Inherent Anisotropy in a Sand." *Geotechnique*, 22(1): 115-128.
2. Arthur, J. R. F., Chua, K. S. and Dunstan, T., 1977, "Induced Anisotropy in a Sand." *Geotechnique*, 27(1): 13-30.
3. Arthur, J. R. F. and Dunstan, T., 1988, "The Engineering Application of Direct and Simple

- Shear Testing." *Geotechnique*, 38(4): 651-662.
4. Chang, O. S. and Lee, C. K., 2004, "Deformation Characteristics of Earth Dam Raised by Non-Homogeneous Fill Materials." *Journal of Korean Society of Geotechnical Engineers*, 20(8): 167-180. (in Korean)
 5. Duncan, J. M., and Chang, C. Y., 1970. "Nonlinear Analysis of Stress and Strain in Soils." *J. Soil Mech. Found. Div., ASCE*, 96(SM5): 1629-1653.
 6. Duncan, J. M., Byrne, P., Wong, K. S., and Mabry, P., 1980, "Strength, Stress-Strain and Bulk Modulus Parameters for Finite Element Analysis of Stresses and Movements in Soil Mass." Report No. UCB-GT-80-01, pp. 1-65.
 7. Im, E. S., Seo, M. W., Ha, I. S. and Kim, W. K., 2005, "Simulation of Earth-fill Dam Behavior Subjected to Water Level Variation Using Geotechnical Centrifuge." *Journal of Korean Society of Civil Engineers*, 25(2C): 95-102. (in Korean)
 8. Jung, C. M., Kim, J. S. and Chae, Y. S., 2002, "Strength Parameters and Shear Behaviors of North-Cheju Basalt Rubble Using Large-Scale Triaxial Test." *Journal of Korean Society of Geotechnical Engineers*, 18(2): 147-160. (in Korean)
 9. Khalid, S., Sigh, B., Nayak, G. C., and Jain, O. P., 1990, "Nonlinear Analysis of Concrete Face Rockfill Dam." *Journal of Geotechnical Engineering*, ASCE, 98(SM7): 653-665.
 10. Kim, S. K. and Lim, H. D., 1987, "Finite Element Analysis on the Behavior of Soyonggang Dam and its Comparison with Observed." *Journal of Korean Society of Civil Engineers*, 7(1): 141-150. (in Korean)
 11. Kim, S. K., Han, S. G., Lee, M. H. and Ahn, A. R., 2001, "An Evaluation of Stress-Strain Behavior of Earth-Rockfill Dam and Causes of Crack due to Water Table Fluctuation." *Journal of Korean Society of Geotechnical Engineers*, 17(6): 149-162. (in Korean)
 12. Kim, Y. S., Kim, B. J., Shin, D. H. and Park, H. G., 2006, "Settlement Behavior Prediction of CFRD After Impounding." *Journal of Korean Society of Civil Engineers*, 26(3C): 209-218. (in Korean)
 13. Kondner, R. L., 1963, "Hyperbolic Stress-Strain Response: Cohesive Soils." *J. of the Soil Mech. Found. Div., ASCE*, 89(SM1): 115-143.
 14. Lam, W. K. and Tatsuoka, F., 1988, "Effects of Initial Anisotropic Fabric and σ_2 on Strength and Deformation Characteristics of Sand." *Soils and Foundations*, 28(1): 89-106.
 15. Marachi, N. D., Chan, C. K., and Seed, H. B., 1972, "Evaluation of Properties of Rockfill Materials." *Journal of the Soil Mechanics and Foundations Division, ASCE*, 8(M1): 95-114.
 16. Oda, M., 1972, "Initial Fabric and thier Relations to Mechanical Properties of Granular Materials." *Soils and Foundations*, 12(1): 17-36.
 17. Oda, M., Koishikawa, I. and Higuchi, T., 1978, "Experimental Study on Anisotropic Shear Strength of Sand by Plane Strain Test." *Soils and Foundations*, 18(1): 25-38.
 18. Oda, M., 1981, "Anisotropic Strength of Cohesionless Sands." *Journal of GE Div., Proc. of ASCE*, 107(GT9): 1219-1231.
 19. Tatsuoka, F., Sakamoto, M., Kawamura, T. and Fukushima, S., 1986, "Strength and Deformation Characteristics of Sand in Plane Strain Compression at Extremely Low Pressures." *Soils and Foundations*, 26(1): 65-84.