

콘크리트 표면차수벽형 석괴댐의 지진 취약도 평가

Evaluation of Seismic Fragility of Concrete Faced Rockfill Dam

백종민¹, 박두희^{1*}, 윤지남³, 최병한⁴

Jongmin Baeg¹, Duhee Park^{2*}, Jinam Yoon³, Byoung-Han Choi⁴

¹Member, Graduate Student, Dept. of Civil and Env. Engineering., Hanyang University, 222 Wangsimni-ro, Seoul 04763, Republic of Korea

²Member, Professor, Dept. of Civil and Env. Engineering., Hanyang University, 222 Wangsimni-ro, Seoul 04763, Republic of Korea

³Nonmember, Ph.D. Student, Dept. of Civil and Env. Engineering., Hanyang University, 222 Wangsimni-ro, Seoul 04763, Republic of Korea

⁴Nonmember, Senior Researcher, Ph.D., Rural Research Institute, Korea Rural Community Co., E870, Haen-ro Sangnok-gu, Ansan-si, Gyeonggi-do 15634, Republic of Korea

ABSTRACT

The fragility curves for CFRD dams are derived in this study for probabilistic damage estimation as a function of a ground motion intensity. The dam crest settlement, which is a widely used damage index, is used for minor, moderate, and extensive damage states. The settlement is calculated from nonlinear dynamic numerical simulations. The accuracy of the numerical model is validated through comparison with a centrifuge test. The fragility curve is represented as a log normal distribution function and presented as a function of the peak ground acceleration. The fragility curves developed in this study can be utilized for real time assessment of the damage of dams.

요 지

본 연구에서는 지반진동 강도에 따른 콘크리트 표면차수벽 석괴댐(CFRD)의 확률론적 피해예측을 위하여 취약도 함수를 개발하였다. 댐의 손상평가에 널리 사용되는 지표인 댐마루 침하량을 손상지수로 사용하여 경미(Minor), 중간(Moderate), 심각(Severe) 손상수준을 정의하였다. 침하량은 댐 표준단면에 대한 비선형 동적 수치해석을 통하여 계산하였다. 수치해석 모델은 원심모형시험결과와 비교하여 정확성을 검증하였다. 취약도 곡선은 대수정규분포함수로 나타내어 최대지반가속도를 기준으로 도출하였다. 본 연구에서 도출된 취약도 곡선은 댐의 실시간 피해예측에 활용될 수 있을 것으로 판단된다.

Keywords : Earthquake, Fill dam, Fragility curve, Damage state, Damage index

1. 서 론

최근 국내에서도 경주지진, 포항지진 등 큰 규모의 지진의 빈도수가 급격하게 증가하였다. 필댐은 국가 주요 시설물 중 하나로서 지진 시 손상이 발생할 경우 심각한 피해를 야기할 수 있다. 국내에서 콘크리트 댐의 경우 지진 취약도 연구가 많이 수행되었으나 필댐과 제방의 지진 취약

도 평가에 관련된 연구는 상대적으로 제한적으로 수행되었다.

국내에서는 댐 설계기준(MOLIT, 2016)에 필댐의 내진 설계 기준이 제시되었다. 동역학적 검토 시 Newmark 변위법(Newmark, 1965)으로 댐 사면의 소성활동량을 계산하여 내진 안전성을 검토한다. 계산된 소성활동량이 0.3m 이내이면 댐 안전에 문제가 되지 않으며, 소성활동량 0.6m는 상당한 손상을 동반하는 허용가능한 소성변형량이다. 이때, 댐 전체 높이를 포함하는 활동면 및 댐체 상부에서의 활동면을 포함하여 검토한다. 소성활동량이 0.6m 이상이면 좀 더 정밀한 동적 소성해석을 실시하여 그 결과를

Received 5 Nov. 2018, Revised 15 Nov. 2018, Accepted 23 Nov. 2018

*Corresponding author

Tel: +82-2-2220-0322; Fax: +82-2-2220-4322

E-mail address: dpark@hanyang.ac.kr (D. Park)

분석한다. 한국시설안전기술공단에서는 기존 댐의 지진시 동적 안전성을 평가하기 위해 “기존댐의 내진성능 평가 및 향상요령(KISTEC, 2004)”을 발간하였다. 댐의 동적 상세 해석을 수행하는 경우, 댐마루 침하와 횡방향 최대 변위가 정적하중에 의한 변위를 포함하여 제체 높이의 1% 이하로 규정하고 있다. 이와 같이 댐의 내진설계 그리고 내진성능평가 방법은 제시되었지만 지진 발생 시 댐의 손상 수준을 확률론적으로 평가하는 데 필요한 취약도 곡선은 아직 제시되지 않았다. 특히 설계지반운동을 초과하는 진동 발생 시 댐의 손상을 예측하는 데에는 취약도 곡선이 특히 중요하다. 취약도 곡선을 적용하기 위해서는 선행적으로 손상상태와 손상지수가 제시되어야 하는 데 이에 관련된 연구도 수행된 사례가 국내에서는 전무하다.

본 연구에서는 기존에 수행되었던 연구들을 분석하여 댐의 손상상태와 손상지수를 정의하였으며 2차원 동적 해석을 수행하여 콘크리트 표면차수벽형 석괴댐(Concrete Faced Rockfill Dam, CFRD)의 취약도 곡선을 개발하였다. 국내에서 사용되는 CFRD 표준단면도를 사용하여 수치해석 모델을 구축하였으며 댐의 비선형성을 모사하였다. 수치해석 모델은 원심모형시험 결과와 비교하여 정확성을 검증하였다.

2. 댐 비선형 동적 수치해석

CFRD는 주암석존, 보조암석존, 선택존 등으로 이루어져 있으며, 선택존의 표면부에 콘크리트 차수벽이 시공된다. 본 연구에서는 국내 CFRD 댐의 표준단면이 사용되었으며 댐의 표준단면 폭은 185m이며 높이는 60m이다. Fig. 1에는 표준 단면에 대한 수치해석 모델을 도시하였다.

본 연구에서는 FLAC 2D(Itasca Consulting Group, 2011) 상용 유한차분해석 프로그램을 사용하여 동적 수치해석을 수행하였다. 구성모델은 Mohr-Coulomb(MC) 모델과 Sig3 모델을 동시에 적용하였다. MC 모델은 가장 널리 사용되는 수치해석 구성모델이기는 하나 미소변형률에서의 비선형성을 고려하지 못하는 단점을 가지고 있다. 본 연구에서

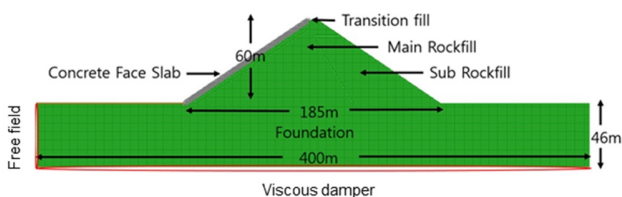


Fig. 1. Numerical modeling of CFRD typical section

는 이를 모사하기 위해서 FLAC 2D에 탑재되어 있는 Sig3 모델을 MC 모델과 결합하여 적용하였다. 미소변형 구간에서는 Sig3 모델이 적용되며 소성 상태에 도달해서는 MC 모델로 소성변위를 계산한다.

$$M_s = \frac{a}{1 + \exp(-(L - x_0)/b)} \quad (1)$$

위 식에서 M_s 는 접선전단탄성계수, L 은 $\log(\gamma)$ 이고 여기서 γ 는 변형률, x_0 , a , b 는 curve fitting 변수이다. Sig3 모델은 Darendeli(2001) 곡선에 부합하도록 이에 상응하는 입력변수를 산출하였다.

해석영역 측면에는 점성댐퍼가 연결된 측면경계에 자유장 운동으로 계산된 동적 응답을 강제적으로 적용하는 방식인 자유장 경계(Free Field) 조건이 적용되었다. 하부에는 Kuhlemeyer and Lysmer(1973)의 점성댐퍼를 적용하여 하향 지반운동을 흡수하여 반무한체 조건을 재현하였다. 지반의 저변형률 감쇠는 Rayleigh 감쇠식으로 모델링하였다. Rayleigh 공식 적용 시, 진동 주파수의 영향을 최소화하는 f_m 과 f_n 조합을 결정해야 한다. f_m 과 f_n 은 각각 암반의 1차 모드와 지진파의 탁월주파수를 사용하였다. 수치해석 대상 댐 모델에 국내 유수의 댐 물성의 평균값 물성을 적용하였다. Table 1에는 주암석, 보조암석, 선택존 등의 물성치를 정리하였다. 암석의 전단파 속도는 Sawada and Takahashi(1975)의 깊이별 경험식을 적용하였으며 Fig. 2에 도시하였다.

CFRD 수치해석 결과는 취약도 곡선 도출에 직접적으로 활용되므로 수치해석 모델의 신뢰도를 확보하는 것은 매우 중요하다. 본 연구에서는 CFRD 수치해석 모델을 원심모형시험(Kim et al., 2011) 계측응답과 비교하여 검증하였다. 원심모형시험에 사용된 댐은 국내 기존 댐의 자료를 바탕으로 표준단면을 적용하였으며, CFRD 단면은 160mm의 높이, 상하류 사면의 기울기 1:1.4로 설계되었

Table 1. Material properties applied to the CFRD numerical model

Division	γ (kN/m ³)	Friction angle (°)	Poisson's ratio
Main Rockfill	21	45	0,3
Sub Rockfill	21	44	0,3
Transition fill	21	42	0,3
Core	20	27	0,35
Bedrock	24	50	0,25

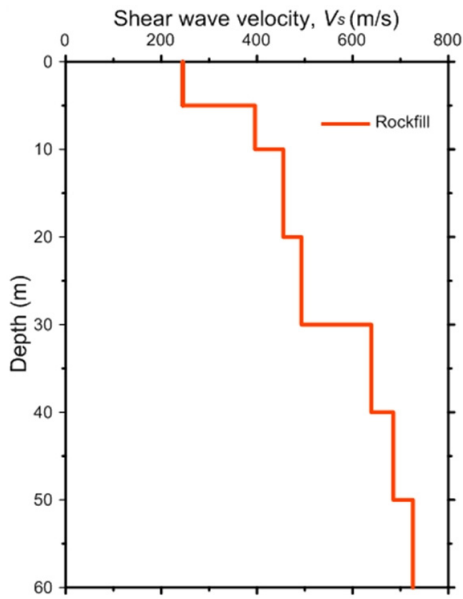


Fig. 2. Shear wave velocity of rockfill

다. 검증에 사용된 원심모형시험의 CFRD 단면과 매설된 가속도 센서(A00, A11, A12, A13, A14)의 위치는 Fig. 3에 도시하였다. 원심모형시험에 사용된 물성치는 Table 2에 정리하였다. 원심모형시험 모델에 상응하는 수치해석 단면은 Fig. 4에 도시하였다. 댐 수치모델의 해석 영역은 폭 18.8m, 6.4m이다. 원심모형 모델이기 때문에 댐 모형의 높이는 표준 단면에 비하여 작지만 이는 수치해석 모델을 검증하기에는 문제가 없다고 판단되어 사용하였다. 해석에서는 원심모형시험의 조건을 반영하여 수치해석 하부 경계조건을 원심모형시험과 동일하게 고정단 조건을 적용하였다. 마찬가지로 해석영역 측면도 강성토조를 모사하기 위하여 표준 단면과는 다르게 자유장 조건이 아닌 고정 조건을 적용하였다.

본 해석에서는 A00 지점의 계측기록(최대지반가속도 = 0.125g)을 수치해석의 입력지진파로 사용하였다. 이를 통

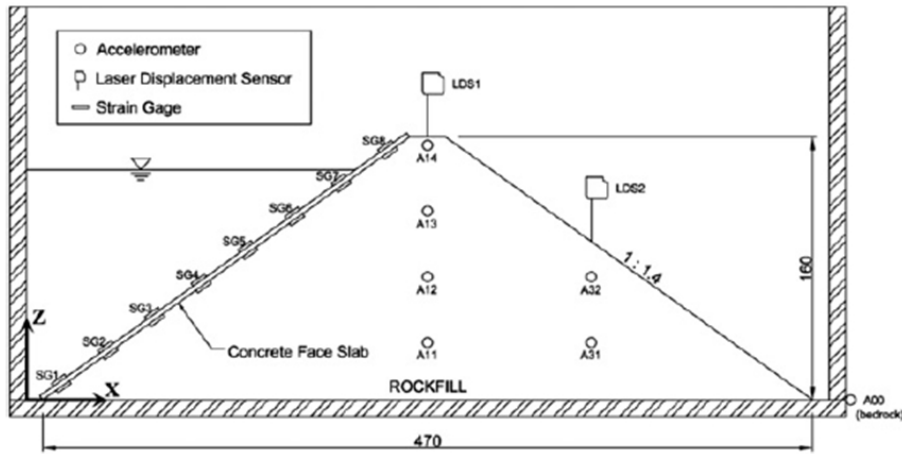


Fig. 3. Layouts of model dams and instrumentation in the model scale (Kim et al., 2011)

Table 2. Centrifuge material properties (Kim et al., 2011)

	γ_d (kN/m ²)	ω (%)	γ_t (kN/m ²)	c (kPa)	ϕ (°)
Rockfill	21.0	4.0	21.0	8.0	43

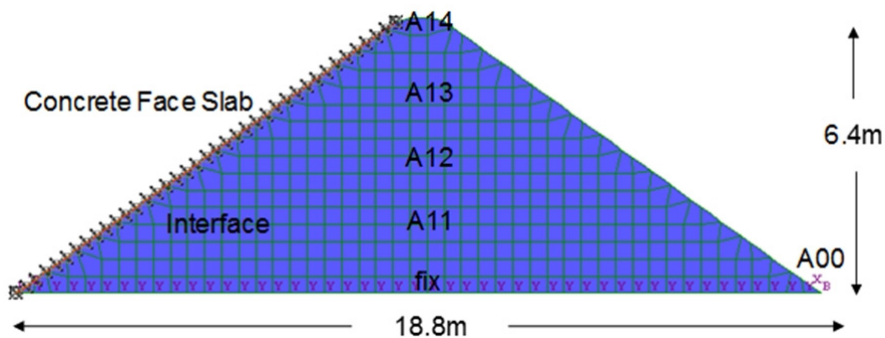


Fig. 4. Numerical modeling of CFRD of the centrifuge test

해 원심모형시험에서 기반암 가속도 0.125g가 가진 되었을 때 A11, A12, A13, A14 각 지점의 가속도 계측기록과 수치해석으로 계산된 결과의 가속도 스펙트럼을 Fig. 5에 도시하였다. 비교 결과 원심모형시험과 수치해석의 결과 값이 유사한 것으로 나타났으며 이로써 본 연구에서 구축한 CFRD 해석모델이 실제 댐의 특성을 정확하게 모사함을 검증하였다.

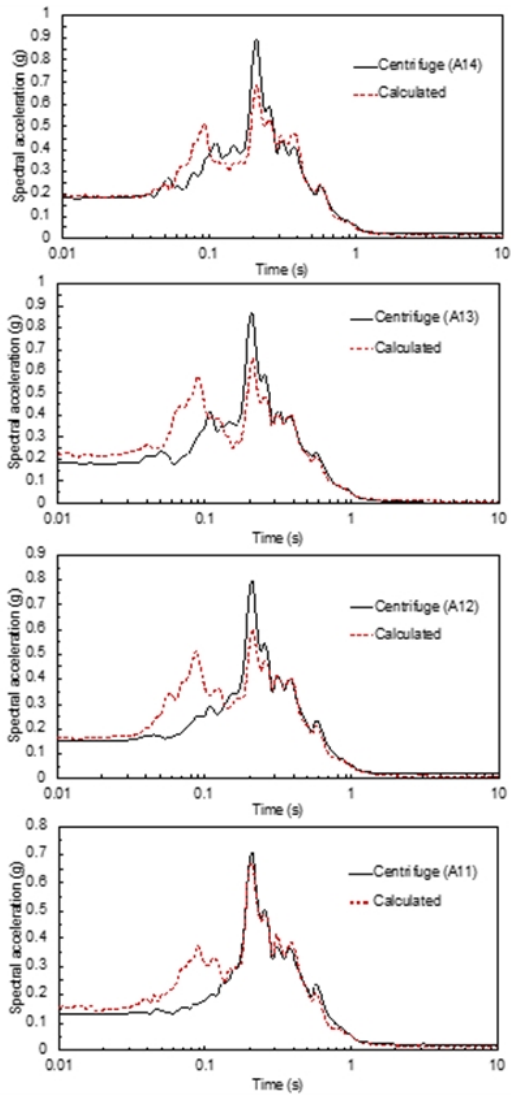


Fig. 5. Comparison of measured acceleration from centrifuge test and numerical results at selected locations

3. 취약도 분석

본 연구에서는 2차원 비선형 동적해석을 수행하여 CFRD의 취약도를 평가하였으며 이의 절차는 아래와 같다.

- (1) 손상상태 및 손상지수 정의
- (2) 수치해석을 수행하여 댐 침하량비 계산
- (3) 취약도 곡선 도출

댐의 손상상태와 손상지수(Damage index, DI)는 Kong et al.(2017)이 제시한 기준을 적용하였으며 이는 Table 3에 정리하였다. Kong et al.(2017)은 DI를 침하량비를 적용하였으며 Minor, Moderate, Severe 3가지 손상상태에 대한 DI 범위를 제시하였다. DI는 Swaisgood(2003)을 참고하되 범위를 수정하였다. 손상상태와 손상지수 정의 후에는 전절에서 기술된 2차원 수치해석 틀을 사용하여 동적해석을 수행하였으며 침하량비를 계산하였다. 취약도 평가에는 총 10개의 암반노두에서 계측된 지반운동을 사용하였으며 최대지반가속도(PGA)를 0.1g에서 1.5g까지 0.1단위로 조정하여 사용하였다. 해석에 사용된 정규화된 계측 지진파는 MPSS(2017) 표준설계스펙트럼과 Fig. 6에 비교하였다.

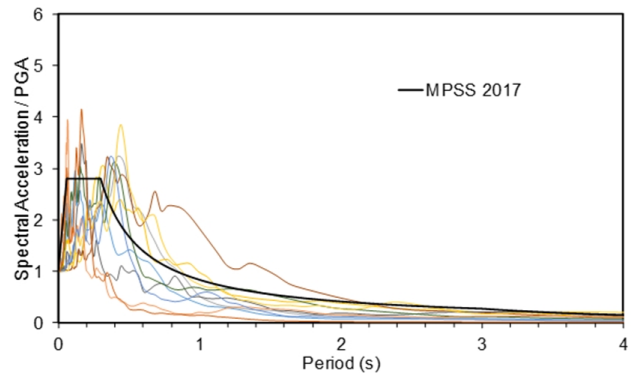


Fig. 6. 5% damped response spectrum of input motions and design response spectrum of Korea (MPSS, 2017) normalized to the PGA

Table 3. Definition of damage states and damage index (Kong et al., 2017)

Dam type	Damage state	Damage index (DI, Dam crest settlement%)
CFRD	None	DI < 0.4
	Minor	0.4 ≤ DI < 0.7
	Moderate	0.7 ≤ DI < 1.0
	Severe	1.0 ≤ DI

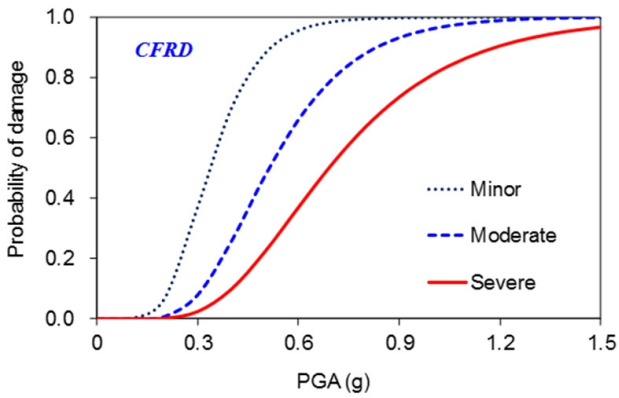


Fig. 7. Fragility curve of CFRD

해석으로 계산된 침하량으로 DI 초과여부를 평가하였다. 침하량비에 기초한 취약도 곡선은 누적정규분포 함수를 이용하여 아래와 같이 정의되었다.

$$P[DS|IM = X] = \Phi\left(\frac{\ln X - \mu}{\beta}\right) \quad (2)$$

여기서, $P[DS | IM]$ = 지반운동 강도 (IM)에서 손상상태를 초과할 조건부 확률, $\Phi(-)$ = 대수정규분포함수, X = 댐의 침하량비, $\mu = \ln X$ 의 중앙값, $\beta = \ln X$ 의 표준편차이다.

Fig. 7에는 3가지 손상상태에 대한 CFRD의 취약도 곡선을 도시하였다. 또한 도출된 취약도 곡선을 국내 기준에 적용하여 내진 I등급 및 특등급 댐의 검토 진도를 사용한 손상상태 확률을 계산하였다. 댐 설계기준(MOLIT, 2016)에 의하면 필댐의 내진설계 동역학적 검토시 극대지진(MCE)하에서 붕괴방지 수준을 만족하는지 검토하도록 되어있다. 여기서 극대지진은 내진 I등급 댐 및 내진 특등급 댐에 대해 위험도 계수를 각각 1.4 및 2.0으로 취한다. 이때, 산출된 진도가 0.14g 이하이면 0.14g를 검토 진도로 취한다. 지진구역 계수의 경우 지진구역 II에 위치한 다목적댐 및 동역학적 검토가 필요한 댐은 지진구역 I의 구역 계수를 채택한다. 내진 I등급 댐의 경우 지진구역 I의 기준으로 구역계수 0.11와 위험도 계수 1.4를 적용하면 0.154g이며 내진 특등급 댐의 경우 지진구역 I의 기준으로 위험도 계수 2.0을 적용하면 0.22g가 설계지반운동 PGA이다.

본 연구에서 도출된 CFRD 취약도 곡선을 사용한 결과, 손상상태가 발생할 확률은 내진 I등급 댐의 기준인 0.154g에서 None 91.9%, Minor 7%, Moderate 1.1%, Severe 0%이며 내진 특등급 댐의 경우 None 72.2%, Minor 22%, Moderate 4.3%, Severe 1.5%이다. 국내 붕괴방지 손상기

준인 댐체에 대한 침하량비 1% 기준 적용 시 붕괴확률은 각각 0%, 1.5%로 발생확률이 극히 작은 것으로 나타났다.

본 연구에서 개발한 취약도 곡선은 콘크리트 표면차수벽형 석괴댐 표준단면에만 적용가능하며 다른 종류의 댐 그리고 다른 단면에는 적용가능하지 않다. 추후 다양한 형태의 댐에 대한 취약도 곡선 개발이 필요할 것으로 판단된다.

4. 결론

지진시 필댐의 손상 예측에 필요한 댐마루 침하량을 산정하기 위하여 일련의 비선형 수치해석을 수행하였다. 비선형 모델은 원심모형실험 결과와 비교하여 정확성을 검증하였다. CFRD 대표단면을 선정하여 2차원 비선형 동적 해석을 수행하였다. 입력지진파는 PGA 0.1g~1.0g, 규모 5.0~8.0 범위의 실제 지진계측기록 10개를 선택하여 적용하였다. CFRD의 취약도 분석을 위해 지진계측기록 10개를 0.1g에서 1.5g까지 조정하여 수치해석을 수행하였다. 수치해석 결과를 통해 손상지수로 정의한 댐마루 침하량과 PGA 사이의 취약도 곡선을 개발하였다. 본 연구에서 도출된 결론은 다음과 같다.

- (1) 원심모형실험 데이터를 확보하여 검증한 결과, 비선형 수치모델은 비교적 정확하게 댐의 동적 응답을 예측하는 것으로 나타났다.
- (2) 지진계측기록 10개를 0.1g에서 1.5g까지 조정하여 수치해석을 수행한 후 취약도 곡선을 도출하였다. 3가지 손상상태 Minor, Moderate, Severe에 대하여 개발하였으며, Severe의 기준을 국내 댐 설계기준인 댐체에 대한 침하량비 1%로 적용했다. 도출된 취약도 곡선을 분석한 결과 내진 I등급 및 특등급 댐에서 극대지진(MCE)하에서 붕괴확률은 최대 0% 와 1.5%로 매우 희박한 확률을 보였다.

Acknowledgement

This research was supported by a grant (2017-MOIS31-002) from Fundamental Technology Development Program for Extreme Disaster Response funded by Korean Ministry of Interior and Safety(MOIS).

References

1. Darendeli, M. B. (2001), *Development of a new family of normalized modulus reduction and material damping curves*, Ph. D. dissertation, University of Texas at Austin.
2. Itasca Consulting Group (2011), *Fast Lagrange Analysis of Continua, Version 7.0*.
3. Kim, M. K., Lee, S. H., Choo, Y. W. and Kim, D. S. (2011), "Seismic behaviors of earth-core and concrete-faced rock-fill dams by dynamic centrifuge tests", *Soil Dynamics and Earthquake Engineering*, Vol.31, No.11, pp.1579-1593.
4. KISTEC (2004), *Evaluation and improvement of seismic performance for the existing dam*, GOVP1200519131, MOCT (in Korean).
5. Kong, X., Pang, R., Zou, D., Xu, B. and Zhou, Y. (2017), "Seismic performance evaluation of high CFRD based on incremental dynamic analysis", *Chin J Geotech Eng*, Vol.1, No.6, pp.6-20. [in Chinese]
6. Kuhlemeyer, R. L. and Lysmer, J. (1973), "Finite element method accuracy for wave propagation problems", *Journal of Soil Mechanics & Foundations Div*, Vol. 99, No. Tech Rpt.
7. MOLIT (2016), *Korean design standard of Dam* (in Korean).
8. MPSS (2017), *Common application of seismic design criteria* (in Korean).
9. Newmark, N. M. (1965), "Effects of earthquakes on dams and embankments", *Geotechnique*, Vol.15, No.2, pp.139-160.
10. Sawada, Y. and Takahashi, T. (1975), "Study on the material properties and the earthquake behaviors of rockfill dams", *Proc. of 4th Japan Earthquake Engineering Symposium*, Tokyo, pp.695-702. (in Japanese)
11. Swaisgood, J. R. (2003), "Embankment dam deformations caused by earthquakes", *Proc. of 2003 Pacific Conference on Earthquake Engineering*, Christchurch NZ.