근거리지진의 영향을 고려한 면진 원전구조물의 지진취약도

Seismic Fragility of Base-Isolated Nuclear Power Plant Considering Effects of Near-Fault Ground Motions

두이-두안 응웬* · 비덱 투사** · 이태형***

Nguyen, Duy-Duan*, Thusa, Bidhek**, and Lee, Tae-Hyung***

Abstract

This study investigates the effect of near-fault ground motions on the seismic fragility of base-isolated nuclear power plant (NPP) structures. Because near-fault motion has either directivity or a so-called fling-step characteristic, or both, three groups of ground motions, namely, near-fault forward-directivity, near-fault fling-step, and far-fault ground motions, are selected for fragility analyses. A base-isolated advanced power reactor 1400 (APR1400), a recently developed NPP in Korea, is employed for numerical analysis. A set of fragility curves are derived for various limit states based on the maximum likelihood estimation. The limit states are defined in terms of deformation capacity of lead rubber bearing (LRB). The numerical results reveal that the median maximum deformations of LRBs were smaller for far-fault ground motions than for near-fault ground motions. In addition, the comparison of fragility curves demonstrates that the probability of failure of base-isolated NPP structures is higher for near-fault ground motions than for far-fault motions given the same earthquake intensity.

Key words : Nuclear Power Plant, Near-fault Ground Motion, Forward-directivity, Fling-step, Base Isolation

요 지

근거리지진은 방향효과(forward-directivity effect)와 플링스텝(fling-step)이라고 부르는 영구지반변형을 유발하는 특징이 있다. 본 논문에서는 근거리지진의 영향을 고려하여 면진된 원자력발전소 구조물의 지진취약도를 평가하였다. 다양한 지진기록을 수집하여 방향효과를 포함한 근거리지진, 플링스텝을 포함한 근거리지진, 원거리지진의 세 그룹으로 분류하였다. 한국형 신행 가압경수로인 APR1400을 수치해석을 위한 대상으로 선정하였다. 지진취약도 곡선은 최우도추정법을 이용하여 도출하였으며, 여기에는 면진장치인 납-고무받침(LRB)의 변형능력을 한계상태로 고려하였다. 해석결과, 원거리지진을 고려했을 때 LRB 최대변형의 중간값이 근거리지진을 고려한 경우보다 작았다. 또한, 동일한 지진강도에 대해서 근거리지진이 원거리지진보다 원전구조물을 손상시킬 확률이 높게 계산되었다.

핵심용어 : 원자력발전소, 근거리지진, 방향효과, 플링스텝, 면진

1. 서 론

근거리지진은 단층의 파단속도, 파단길이, 미끄러짐 방향 및 기타 요인에 영향을 받는 복잡한 특성으로 구성된다. 근거리 지진의 고유한 특징은 지진 발생시 구조물에 심각한 손상을

줄 수 있다. 근거리 지진이 시설물에 주는 영향에 대해서는 많은 연구가 수행되었다(Liao et al., 2004; Kalkan and Kunnath, 2006; Jamnani et al., 2013; Zhang and Wang, 2013; Eskandari and Vafaei, 2015; Bhandari et al., 2018; Zhang et al., 2018). 이들 선행연구에서는 근거리지진의 특징을 방향효과(forward-

*정회원, 건국대학교 인프라시스템공학과 박사과정(E-mail: duan468@gmail.com)

Member, Ph.D. Candidate, Department of Civil Engineering, Konkuk University

**건국대학교 인프라시스템공학과 석사과정(E-mail: letterbidhek@gmail.com)

Graduate Student, Department of Civil Engineering, Konkuk University

***교신저자, 정회원, 건국대학교 사회환경공학부 교수(Tel: +82-2-450-4093, Fax: +82-2-450-4093, E-mail: thlee@konkuk.ac.kr)

Corresponding Author, Member, Professor, Department of Civil and Environmental Engineering, Konkuk University

directivity effect)와 플링스텝(fling-step)으로 구분하였다.

한국에 건설된 원자력발전소의 일부는 단층으로부터 멀리 떨어진 곳에 위치하고 있고, 2016년 경주지진과 2017년 포항지진 이후, 원자력발전소의 지진에 대한 안전이 범국민적인 관심을 끌고 있다. 지진에 대한 안전성 해석과 취약도평가와 관련된 연구는 많이 진행되었다(Choi et al., 2006, 2008; Galal and Ghobarah, 2006; Eem et al., 2013; Perotti et al., 2013; Kim and Lee, 2015; Lee and Song, 2015; He et al., 2016; Kim et al., 2016; Lee et al., 2016). 선행연구 중 Choi et al. (2006, 2008)은 한국에 건설된 비면진 CANDU type 원전 격납건물의 지진취약도곡선을 도출하였고 여기서 근거리지진을 고려하였다. 그들은 강성이 상대적으로 높은 격납고 건물은 근거리지진의 영향이 그리 크지 않은 것으로 결론지었다. 이 연구에서는 방향효과, 플링스텝, 원거리지진의 영향 등을 고려하지 않았다.

본 논문의 목적은 근거리지진의 방향효과와 플링스텝을 고려하여 면진된 APRI400 원전건물의 지진취약도를 평가하는 것이다. 지진취약도 곡선을 도출하기 위해서 LRB의 전단변형 공급역량(shear strain capacity)을 한계상태로 설정하였다. 다양한 지진가속도 시간이력을 수집하여 방향효과 근거리지진, 플링스텝 근거리지진, 원거리지진의 세 그룹으로 분류한 후 원전 지진취약도 곡선에 대한 각각의 영향을 분석하였다.

2. 입력지반운동

2.1 근거리지진의 특징

근거리지진은 충격파와 같은 형태로 상당한 양의 단층에너지

를 포함하고 있다(Bhandari et al., 2018). 충격파는 보통 가속도, 속도, 변위 시간이력을 통해서 구분할 수 있다. 근거리지진의 두 가지 전형적인 효과는 방향효과와 플링스텝이라고 부르는 영구지반변형이 있다. 방향효과는 단층파단으로 인한 지진파의 전파속도가 전단파속도에 가까울 때 발생한다. 이 현상은 속도시간이력곡선에서 짧은 지속시간의 장주기, 고진폭의 충격파를 동반한다. 주향이동단층으로 인한 지진 시 단층 연장선의 수직방향으로 최대지반변위가 발생한다(Kalkan and Kunnath, 2006; Eskandari and Vafaei, 2015).

반면, 플링스텝 효과는 단층파단메커니즘과 연관된 지각의 구조적 변형으로 인한 지반의 영구변형을 유발한다. 이 현상의 특징은 일방향 고진폭 속도충격파와 변위시간이력곡선에서 계단모양의 단조증가를 관찰할 수 있는 것이다(Bhandari et al., 2018). Fig. 1은 방향효과 근거리지진, 플링스텝 근거리지진, 원거리지진의 가속도, 속도, 변위 시간이력을 비교하여 보여준다. 이 그림에서, 1979 Imperial Valley 지진은 속도충격파를 보여주고, 1999 Kocaeli 지진은 플링스텝의 특징인 영구지반변위를 변위시간이력의 뒷부분에서 관찰할 수 있다. 원거리지진의 예시인 1971 San Fernando 지진은 속도충격파나 플링스텝이 관찰되지 않는다.

2.2 입력지진파

본 연구에서는 PEER cetner database (PEER, 2018)를 분석하여 방향효과 근거리지진, 플링스텝 근거리지진, 원거리지진의 세 그룹에 각각 20개씩의 지진가속도 시간이력을 선정하였다. 각 그룹에 대한 가속도, 속도, 변위응답스펙트럼을 Fig. 2에 표시하였다. 여기서 굵은 선은 평균스펙트럼을 나타낸다.

Fig. 1. Typical Time-histories of (a) near-fault forward-directivity, (b) fling-step, and (c) far-fault ground motions

Fig. 2. Response Spectra of Selected Ground Motions

3. 원전구조 모델링

본 논문에서는 한국형 신형 가압경수로인 APR1400 (KEPCO, 2018)을 지진취약도해석의 대상으로 선정하였다. 특히 격납건물과 보조건물에 면진장치가 설치된 것으로 가정하였다. 범용 구조해석프로그램인 SAP2000 (CSI, 2013)의 보요소를 이용하여 집중질량 막대모델로(lumped-mass stick model) 구조물을 모델링하였다. 격납건물과 보조건물의 설계단면을 분석하여 보요소의 단면물성값을 계산하였다 (Kim and Lee, 2015; Kim et al., 2016; Lee et al., 2016). 구조물의 벽체와 층의 질량에서 계산한 등가질량은 각 노드에 할당되었다. 격납건물의 총 질량은 3,821.15 ton으로 94.64 m의 높이를 15개의 노드로 나누었고 최소 81.38 ton에서 최대 376.80 ton까지의 노드질량이 분포하도록 모델링하였다. 보조건물의 총 질량은 26,541.25 ton으로 63.39 m의 높이를 8개의 노드로 나누어 최소 957.38 ton에서 최대 5,265.66 ton까지의 노드질량이 분포하도록 모델링하였다. 격납건물과 보조건물을 동시에 지지하는 매트기초는 탄성셀요소로 모델링하였다.

면진장치는 486개의 LRB가 매트기초의 밑에 설치된 것으로 가정하였다. SAP2000에서 구현한 유한요소 구조모델을 Fig. 3에 나타내었다. Fig. 4는 LRB의 배치도와 이산형모델로 표현한 전단력-변위관계를 보여준다. 여기서 힘-변위관계를 정의하는 물성값은 Table 1에 제시하였다.

Fig. 3. Finite Element Model of Base-isolated NPP Structure

Table 1. Mechanical Properties of LRBs

Properties	Values
Elastic stiffness, K_u	537,703 kN/m
Hardening stiffness, K_d	4,204.84 kN/m
Yield strength, F_y	1,009.65 kN
Characteristic strength, Q_d	1,001.03 kN

구조모델에 대한 고유치해석을 수행하여 1번~3번모드까지의 고유진동수와 고유주기를 Table 2에 제시하였다.

(a) Layout of LRBs

(b) Shear force-deformation relationship

Fig. 4. Layout and Properties of LRB

여기서 1번과 2번 모드는 상부구조 전체의 횡방향변위모드이고 3번과 4번 모드는 각각 격납건물의 회전모드와 횡방향변위모드를 나타낸다.

Table 2. Eigenvalue Analysis Results

Mode	Natural frequency	Natural period
1	0.476 Hz	2.096 sec
2	0.477 Hz	2.095 sec
3	0.709 Hz	1.408 sec
4	3.786 Hz	0.264 sec

4. 원전구조의 지진거동

면진장치가 설치된 구조물은 설계지진이 발생했을 때, 면진장치는 비선형거동을 하고 상부구조는 선형탄성거동을 하는 것을 기대할 수 있으므로 구조물 전체의 지진거동을 이해하기 위해서는 비선형해석이 요구된다. 본 연구에서는 선정된 지진가속도 시간이력을 이용하여 면진된 원전구조물의 비선형 시간이력해석을 수행하였다. 지진가속도 시간이력은 모두 횡방향으로만 입력되었고 수직방향 가속도는 고려하지 않았다.

지진취약도 곡선을 도출하기 위해서는 구조물의 손상(또는 파괴)이 시작되는 상태를 한계상태로 설정해야 하므로,

본 연구에서는 면진된 원전구조물의 면진장치를 구조물의 가장 취약한 요소로 가정하였다. 따라서 대상 구조물의 지진해석을 통해 면진장치의 전단변형을 관찰하였다.

Fig. 5는 각 지진그룹, 즉 방향효과, 플링스텝, 원거리지진 그룹을 대표하는 지진파(PGA = 0.4g)를 입력하여 수행한 구조해석을 통해 얻은 LRB의 전단력-전단변형곡선을 보여준다. 여기서 전단력은 LRB에 전달되는 전단력이고, 전단변형은 LRB의 상하부 횡방향 변위의 차이를 뜻한다. 근거리지진에 의한 LRB의 변형응답이 원거리지진에 의한 응답보다 훨씬 크게 나타난 것을 관찰할 수 있다.

Fig. 6은 다양한 지진규모에 대한 LRB의 최대전단변형을 각 지진그룹별로 보여준다. 여기서 점선은 각각 다른 지진파에 의한 결과의 평균값을 나타낸다. 근거리지진에 의한 평균 최대전단변형이 원거리지진에 의한 것보다 크게 나타난 것을 관찰할 수 있고 이는 근거리지진의 충격파특성 때문인 것으로 판단된다.

5. 지진취약도 해석

5.1 한계상태

지진취약도는 특정한 수준의 지진이 발생했을 때 구조물이 미리 설정한 한계상태(손상 또는 파괴)를 넘어설 조건부 확률을 뜻한다. 면진장치가 설치된 원전구조물의 경우 지진이 발생하면 격납건물과 보조건물 등의 상부구조는 탄성거

Fig. 5. Behavior of LRB Under Different Earthquakes with PGA = 0.4g

Fig. 6. Lateral Deformation of LRB Versus PGA with Different Ground Motions

동을 하지만 면진장치는 큰 변형을 일으키게 된다. 지진의 규모에 따라 면진장치는 항복강도를 초과하는 전단력을 받을 수도 있고, 설계수준을 초과하는 지진이 발생하게 되면 면진장치는 극한변형을 경험할 수도 있다. 본 논문에서는 LRB에 발생하는 전단변형을 기준으로 손상 수준을 설정하고 이를 취약도평가를 위한 한계상태로 정의하였다.

LRB의 전단변형률 γ 는 Eq. (1)과 같이 정의할 수 있다.

$$\gamma = \frac{\Delta}{H} \quad (1)$$

여기서, Δ 와 H 는 각각 LRB의 최대횡방향변위와 높이를 나타낸다. 본 논문에서는 Zhang and Huo (2008), Eem et al. (2013), Lee and Song (2015)에서 사용한 LRB의 한계상태를 적용하였다. 본 논문에서 정의한 3가지 한계상태를 Table 3에 나타내었다. 여기서, LS1, LS2, LS3은 각각 LRB의 경미한 손상, 중간정도 손상, 심각한 손상상태를 의미한다.

Table 3. Definition of Limit States

Limit state	Shear strain of LRB	Maximum lateral deformation of LRB
LS1	$\gamma \geq 50\%$	200 mm
LS2	$\gamma \geq 100\%$	400 mm
LS3	$\gamma \geq 150\%$	600 mm

5.2 최우도추정법

본 논문에서는 지진취약도 곡선을 도출하는 방법 중 Shinozuka, Feng, Kim, et al. (2000), Shinozuka, Feng, Lee, et al. (2000)이 제안한 최우도추정법(maximum likelihood estimation method)을 이용하였다. 이 방법은 취약도함수를 대수정규분포의 누적분포함수(CDF)로 가정하며 k 번째 한계상태에 대한 CDF, F_k 는 Eq. (2)와 같이 표현한다.

$$F_k(a) = \Phi \left[\frac{\ln(a/c_k)}{\zeta_k} \right] \quad (2)$$

여기서, a 는 지진의 강도(본 논문에서는 PGA), c_k 와 ζ_k 는 각각 대수정규분포 CDF의 중앙값과 대수표준편차이며 $\Phi(\cdot)$ 는 표준정규분포의 CDF이다. Eq. (2)에서 아래첨자 k 는 2개 이상의 한계상태를 고려할 때 k 번째 한계상태를 뜻한다. 최우도추정법에서는 Eq. (3)으로 표시되는 우도함수의 최대값을 구하는 방법으로 c_k 와 ζ_k 를 결정한다.

$$L = \prod_{i=1}^n [F_k(a_i)]^{x_i} [1 - F_k(a_i)]^{(1-x_i)} \quad (3)$$

여기서, n 은 해석에 고려한 지진파의 개수를 나타내며, x_i 는 구조물이 손상을 입었거나 입지 않은 상태를 표현하는 베르누이 확률변수로 손상을 입으면 1, 손상을 입지 않으면 0의 값을 취한다. Eq. (3)이 c_k 와 ζ_k 에 대하여 최대값을 갖도록 하기 위해 미분을 취하면 Eq. (4)와 같이 표현되며 미분값이 0이 되도록 하는 c_k 와 ζ_k 을 결정한다.

$$\frac{\partial L}{\partial c_k} = 0, \quad \frac{\partial L}{\partial \zeta_k} = 0, \quad k=1, 2, \dots, N_{LS} \quad (4)$$

여기서, N_{LS} 는 한계상태의 개수를 뜻한다.

5.3 취약도곡선

미리 선정한 세 그룹의 지진파를 이용하여 3가지 한계상태에 대한 면진원전구조물의 취약도곡선을 도출하여 이를 Fig. 7에 나타내었다. 국내 원전내진설계기준의 설계지진 중 하나인 운전기준지진(OBE, PGA = 0.2 g)보다 작거나 같은 수준의 지진이 발생했을 때 면진원전구조물에는 어떤 손상도 발생하지 않는 것을 알 수 있다. 근거리지진의 경우 안전정지지진(SSE, PGA = 0.3 g) 수준의 지진이 발생하면 원전구조물에 경미한 손상(LS1)이 발생할 확률이 10%로 계산되었으며, 그보다 심각한 손상은 발생하지 않는 것으로 나타났다. 한편, 원거리지진의 경우 같은 안전정지지진 수준의 지진에 의해서는 손상이 발생하지 않는 것으로 나타났다.

Fig. 8은 같은 한계상태에 대한 지진그룹별 지진취약도곡선을 비교하여 보여준다. 근거리지진에 의한 취약도곡선이 원거리지진의 취약도곡선보다 위에 있으므로 해석대상인

Fig. 7. Fragility Curves with Various Ground Motion Groups

Fig. 8. Comparison of Fragility Curves with Different Limit States

원전구조물은 근거리지진에 더 취약하다고 평가할 수 있다. 그 원인으로는 앞서 4절에서 언급한 바와 같이, 면진장치가 원거리지진보다 근거리지진에 대해 더 큰 전단변형을 보이기 때문인 것을 들 수 있다. 한편, 방향효과 지진그룹과 플링스텝 지진그룹에 대한 취약도곡선의 비교결과 두 지진그룹에 의한 취약도곡선의 차이는 무시할만한 것으로 평가된다.

6. 결 론

본 논문에서는 근거리지진의 특성을 고려하여 면진장치가 설치된 원전구조물의 취약도를 평가하였다. 60개의 지진 가속도 시간이력으로부터 근거리지진의 특징인 방향효과와 플링스텝을 각각 포함한 지진그룹, 비교를 위한 원거리지진 그룹을 구성하여 일련의 비선형시간이력해석을 수행하였다. 면진장치의 손상을 기준으로 3단계의 한계상태를 설정하였고, 최우도추정법을 이용하여 원전구조물의 지진취약도곡선을 도출하였다. 해석결과로부터 도출한 결론을 다음에 열거하였다.

- (1) 원거리지진이 발생했을 때보다 근거리지진이 발생했을 때 LRB의 최대전단변형이 크게 관찰되었다. 이는 근거리지진의 고진폭 충격과 특성이 원인으로 분석된다.
- (2) 원거리지진이 발생했을 때보다 근거리지진이 발생했을 때 면진원전구조의 손상확률이 더 크게 나타났다.
- (3) PGA 0.2 g 이하의 지진이 발생하면 면진원전구조는 손상을 입지 않는다. PGA 0.3 g 이하의 지진이 발생하면 면진원전구조에 경미한 손상이 발생할 확률이 10% 이하

로 계산되었고, 이는 근거리지진일 경우에 해당한다.

- (4) 근거리지진의 두 가지 특징인 방향효과와 플링스텝이 각각 면진원전구조의 지진취약도에 미치는 영향에 대한 차이는 무시할 만한 수준으로 관찰되었다.

감사의 글

이 논문은 2017년도 정부(산업통상자원부)의 재원으로 한국에너지기술평가원의 지원을 받아 수행된 연구임(No. 20171510101860).

References

- Bhandari, M., Bharti, S.D., Shrimali, M.K., and Datta, T.K. (2018). The numerical study of base-isolated buildings under near-field and far-field earthquakes. *Journal of Earthquake Engineering*, Vol. 22, No. 6, pp. 989-1007.
- Choi, I.K., Choun, Y.S., Ahn, S.M., and Seo, J.M. (2006). Seismic fragility analysis of a CANDU type NPP containment building for near-fault ground motions. *KSCE Journal of Civil Engineering*, Vol. 10, No. 2, pp. 105-112.
- Choi, I.K., Choun, Y.S., Ahn, S.M., and Seo, J.M. (2008). Probabilistic seismic risk analysis of CANDU containment structure for near-fault earthquakes. *Nuclear Engineering and Design*, Vol. 238, No. 6,

- pp. 1382-1391.
- CSI. (2013). *SAP2000 user manual*, Computers and structures Inc. Berkeley, CA, USA.
- Eem, S.H., Jung, H.J., Kim, M.K., and Choi, I.K. (2013). Seismic fragility evaluation of isolated NPP containment structure considering soil-structure interaction effect. *Journal of the Earthquake Engineering Society of Korea*, Vol. 17, No. 2, pp. 53-59.
- Eskandari, R., and Vafaei, D. (2015). Effects of near-fault records characteristics on seismic performance of eccentrically braced frames. *Structural Engineering and Mechanics*, Vol. 56, No. 5, pp. 855-870.
- Galal, K., and Ghobarah, A. (2006). Effect of near-fault earthquakes on North American nuclear design spectra. *Nuclear Engineering and Design*, Vol. 236, No. 18, pp. 1928-1936.
- He, Q., Li, X., Li, Y., Liu, A., and Zhang, J. (2016). Dynamic nonlinear time-history analysis of nuclear power plant under near-fault ground motion with velocity pulse. *Seventh China-Japan-US Trilateral Symposium on Lifeline Earthquake Engineering*, Shanghai, China.
- Hamidi Jamnani, H., Karbassi, A., and Lestuzzi, P. (2013). Fling-step effect on the seismic behaviour of high-rise RC buildings during the Christchurch earthquake. *Proceedings of the 2013 NZSEE Conference*, Wellington, New Zealand.
- Kalkan, E., and Kunnath, S.K. (2006). Effects of fling step and forward directivity on seismic response of buildings. *Earthquake Spectra*, Vol. 22, No. 2, pp. 367-390.
- KEPCO (Korea Electric Power Corporation). (2018). *APRI400*. Retrieved from <https://www.kepco-enc.com/portal/contents.do?key=1240>
- Kim, G.-J., Yang, K.-K., Kim, B.-S., Kim, H.-J., Yun, S.-J., and Song, J.-K. (2016). Seismic response evaluation of seismically isolated nuclear power plant structure subjected to Gyeong-Ju earthquake. *Journal of the Earthquake Engineering Society of Korea*, Vol. 20, No. 7, pp. 453-460.
- Kim, J.-M. and Lee, E.-H. (2015). *Development and verification of simplified beam-stick model of seismically isolated APRI400 nuclear power plant structure*. Research report, Central Research Institute of KHNP, KETEP Project No. 2014151010170B.
- Lee, E.-H., Kim, J.-M., Joo, K.-H., and Kim, H.-U. (2016). Evaluation of the soil-structure interaction effect on seismically isolated nuclear power plant structures. *Journal of the Earthquake Engineering Society of Korea*, Vol. 20, No. 6, pp. 379-389.
- Lee, J.H., and Song, J.K. (2015). Seismic fragility analysis of seismically isolated nuclear power plant structures using equivalent linear- and bilinear- lead rubber bearing model. *Journal of the Earthquake Engineering Society of Korea*, Vol. 19, No. 5, pp. 207-217.
- Liao, W.I., Loh, C.H., and Lee, B.H. (2004). Comparison of dynamic response of isolated and non-isolated continuous girder bridges subjected to near-fault ground motions. *Engineering Structures*, Vol. 26, No. 14, pp. 2173-2183.
- PEER (Pacific Earthquake Engineering Research Center). (2018). *Peer ground motion database*. Retrieved from <https://peer.berkeley.edu/peer-strong-ground-motion-database>
- Perotti, F., Domaneschi, M., and De Grandis, S. (2013). The numerical computation of seismic fragility of base-isolated Nuclear Power Plants buildings. *Nuclear Engineering and Design*, Vol. 262, pp. 189-200.
- Shinozuka, M., Feng, M.Q., Kim, H.K., and Kim, S.H. (2000). Nonlinear static procedure for fragility curve development. *Journal of Engineering Mechanics*, Vol. 126, No. 12, pp. 1287-1295.
- Shinozuka, M., Feng, M.Q., Lee, J., and Naganuma, T. (2000). Statistical analysis of fragility curves. *Journal of Engineering Mechanics*, Vol. 126, No. 12, pp. 1224-1231.
- Zhang, M., Parke, G., and Chang, Z. (2018). The dynamic response and seismic damage of single-layer reticulated shells subjected to near-fault ground motions. *Earthquake and Structures*, Vol. 14, No. 5, pp. 399-409.
- Zhang, S., and Wang, G. (2013). Effects of near-fault and far-fault ground motions on nonlinear dynamic response and seismic damage of concrete gravity dams. *Soil Dynamics and Earthquake Engineering*, Vol. 53, pp. 217-229.
- Zhang, J., and Huo, Y. (2008). Optimum isolation design for highway bridges using fragility function method. *The 14th World Conference on Earthquake Engineering (14WCEE)*, October 12-17, Beijing, China.

Received	October 25, 2018
Revised	October 30, 2018
Accepted	November 5, 2018